

CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN
Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia

ALGUNOS ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y REHABILITACIÓN DE LA VIVIENDA RURAL DE ADOBE

Leonardo E. Flores
Miguel A. Pacheco
Carlos Reyes

IEG/03/01
Marzo, 2001

SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL

COORDINACIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

ALGUNOS ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y REHABILITACIÓN DE LA VIVIENDA RURAL DE ADOBE

Leonardo E. Flores
Miguel A. Pacheco
Carlos Reyes

Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia

Marzo del 2001

ALGUNOS ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO Y REHABILITACIÓN DE LA VIVIENDA RURAL DE ADOBE

RESUMEN

Con objeto de estudiar las condiciones de seguridad estructural de la vivienda de adobe y de recomendar algunas técnicas de rehabilitación se realizó una extensa revisión bibliográfica de los daños sufridos por viviendas de adobe en sismos recientes, así como la revisión de estudios analíticos y de ensayes de laboratorio.

Se determinó que la vivienda típica de adobe tiene características estructurales que hacen que su comportamiento sísmico difiera al de las estructuras modernas de mampostería, en especial por tener su masa distribuida en los muros, la falta de diafragma rígido y la falta de una liga eficiente entre muros. Se determinó que en la respuesta sísmica predomina la tendencia de volteo de los muros fuera de su plano lo que causa agrietamientos verticales en esquinas, volteo central en muros largos y la caída de techos. Para evitar este efecto, las técnicas de rehabilitación deben, en general, mejorar la liga entre los muros. Con base en esta revisión se determinó que las principales técnicas de rehabilitación recomendadas son la construcción de dalas de concreto reforzado con dentellones en esquinas, la construcción de dalas y castillos de concreto como en las estructuras de mampostería confinada, y el uso de malla de alambre y recubrimiento de mortero en todo el muro o en bandas colocadas en las bordes y esquinas.

Como resultado de este estudio se elaboró un material gráfico a modo de cartilla de rehabilitación que se presenta en el Anexo A. Dicho material será básico para la elaboración y difusión de cartillas a la población rural.

SUMMARY

In order to verify the structural safety and retrofitting techniques of the adobe-type housing a program of documental review of recent reports of seismic damage in rural housing as well as the review of analytical and experimental studies has been performed.

It was found that the dynamical and structural behavior of adobe-type structures differ of that of the modern masonry buildings, specially due to the uniformly distributed mass in the walls, the lack of rigid-diaphragm effect and the poor link between orthogonal walls. The dominant response was found to produce out-of-plane overturning moment follow of vertical cracks in corners, collapse of central part in long walls and the loss of bearing in roof systems. In these cases, the retrofitting techniques essentially must improve the link between orthogonal walls. The most common techniques are the construction of horizontal reinforced concrete elements in the upper edge of walls (beams), the use of horizontal and vertical concrete elements as in confined masonry (tie-columns and beams), and the wall jacketing with welded-wire-mesh or hexagonal mesh and mortar cover placed in both the whole wall or in bands located on edges and corners.

As result of this study, a graphic material, included in Appendix A, was prepared for use as retrofitting guidelines. This material will be a reference for future developing of guidelines or charts for seismic retrofitting and for their distribution among the rural population.

CONTENIDO

RESUMEN ... I

SUMMARY ... I

CONTENIDO ... III

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN ... 1

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES ... 3

2.1 MARCO HISTÓRICO ... 3
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL ADOBE ... 6
2.2.1 Selección del Suelo ... 6
2.2.2 Fabricación de las Piezas de Adobe ... 9
2.3 GEOMETRÍA TÍPICA DE LAS VIVIENDAS DE ADOBE ... 11
2.4 NORMATIVIDAD ... 12
2.4.1 Ensayes de Materiales ... 14
2.4.2 Reglamento de Construcción de Nuevo México para Adobe ... 18
2.4.3 Otros Reglamentos ... 19

CAPÍTULO 3 COMPORTAMIENTO OBSERVADO DE LA VIVIENDA DE ADOBE ... 21

3.1 GENERAL ... 21
3.2 EVENTOS SÍSMICOS RECIENTES ... 22
3.2.1 Ometepec, 1995 ... 23
3.2.2 Manzanillo, 1995 ... 25
3.2.3 Villaflores, Chiapas, 1995 ... 27
3.2.4 Caleta de Campos, 1997 ... 28
3.2.5 Tehuacán, 1999 ... 28
3.3 RESUMEN DE DAÑOS OBSERVADOS ... 33

CAPÍTULO 4 ESTUDIOS DE CAMPO, ANALÍTICOS Y EXPERIMENTALES ... 39

4.1 INVESTIGACIÓN DEL ADOBE EN PERÚ ... 39
4.2 INVESTIGACIÓN EN EL SALVADOR ... 41
4.3 INVESTIGACIÓN EN CHILE ... 43
4.4 INVESTIGACIÓN EN MÉXICO: ESTUDIOS ANALÍTICOS ... 44
4.4.1 Análisis Dinámico con el Método del Elemento Finito ... 45
4.4.2 Método Simplificado para Análisis Sísmico de Estructuras de Adobe ... 48
4.5 ENSAYES EN MESA VIBRADORA DE UNA ESTRUCTURA DE ADOBE A ESCALA ... 50
4.5.1 Propiedades Mecánicas del Adobe ... 51
4.5.2 Pruebas Dinámicas en Mesa Vibradora ... 53
4.6 ENSAYES A ESCALA NATURAL DE MUROS DE ADOBE REHABILITADOS ... 59
4.6.1 Geometría de los Modelos y Tipo de Ensaye ... 59
4.6.2 Resultados de los Ensayes ... 63
4.6.3 Conclusiones de los Ensayes en Muros de Adobe ... 65

CAPÍTULO 5 DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO Y TIPOS DE DAÑO ... 67

5.1 COMPORTAMIENTO GENERAL ... 67
5.1.1 Liga entre Muros ... 67
5.1.2 Trabajo de un Diafragma Rígido ... 69
5.2 TIPOS PRINCIPALES DE FALLA ... 70
5.2.1 Agrietamiento Vertical en Esquinas ... 70

5.2.2 Volteo Central en Muros Largos 71
5.2.3 Caída de Techos 72
5.2.4 Agrietamiento Inclinado 73
5.2.5 Otros tipos de Fallas....74

CAPÍTULO 6 TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN DE LA VIVIENDA DE ADOBE 77

6.1 INTRODUCCIÓN....77
6.2 UBICACIÓN Y GEOMETRÍA BÁSICA DE LA VIVIENDA....78
6.3 TÉCNICAS DE REPARACIÓN LOCAL....79
6.4 CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO Y AMARRE 79
6.4.1 Construcción de Dalas en la Parte Superior 79
6.4.2 Construcción de Castillos y Dalas 80
6.4.3 Elementos de Amarre de Madera....82
6.4.4 Tensores de Acero 83
6.4.5 Encamisado de Muros con Malla y Mortero 83
6.5 VOLTEO CENTRAL EN MUROS LARGOS 86
6.6 MODIFICACIONES DE TECHOS....87
6.7 CIMENTACIÓN....90
6.8 RECOMENDACIONES GENERALES 91
6.9 COMENTARIOS FINALES....91

APÉNDICE A CARTILLA DE REHABILITACIÓN, CENAPRED 93

APÉNDICE B CARTILLA DE REHABILITACIÓN, SAHOP 109

REFERENCIAS 121

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La vivienda es, sin lugar a duda, una de las necesidades fundamentales de los seres humanos, y lo ha sido desde los tiempos más remotos. El contar con un lugar fijo y seguro donde establecerse, permitió a los grupos nómadas de la antigüedad establecerse y desarrollarse como civilizaciones sedentarias, y tener un punto de transmisión de su cultura, creencias y tradiciones, así como contar con un patrimonio básico para la familia: la vivienda. El tipo de sistema constructivo más usado a lo largo de la historia para la construcción de vivienda, tanto en nuestro país como en la mayor parte de América Latina, es el uso de mampostería para los muros de carga y divisorios. Actualmente se estima que más del 90 por ciento de la vivienda en México se estructura a base de muros de mampostería, y que más de la mitad del volumen de construcción se dedica a la edificación de vivienda (ICA, 1999 y Hernández, 1993), por ello resalta la importancia de ésta en la industria de la construcción.

Los tipos de mampostería han ido desde la mampostería de piedras naturales, hasta las piezas industrializadas y sistemas estructurales reforzados con elementos de concreto reforzado de dimensiones reducidas; mientras que los sistemas de piso y techo han variado desde el uso de vigas madera con techos de palma, madera, terrados o tejas, hasta el uso moderno de acero y concreto. Por lo que respecta a la elaboración de las piezas de mampostería, en general se ha hecho uso de los materiales disponibles en cada región. Entre ellos se tienen las piezas de arcilla, de concreto (o arena–cemento) y otros materiales como las piezas sílico–calcáreas, uso de mezclas asfálticas, materiales plásticos, etc.

En especial, el uso de arcilla o “barro”, amasada con agua y moldeada para formar elementos prismáticos, constituye uno de los sistemas más antiguos y de mayor uso en nuestro país. Si estas piezas son cocidas o “quemadas” en horno se les denomina tabiques o ladrillos, y pueden ser procesadas manualmente (artesanales) o fabricadas en industria mediante el uso de maquinaria que amasa, extrae el aire mediante presión, y extruye el material por una boquilla con la geometría para formar piezas macizas o huecas con distintos diseños de celdas o perforaciones (Ojeda, 1999). De hecho, al ser la arcilla uno de los materiales de construcción más abundantes en la naturaleza, ha sido utilizado en todas las épocas alrededor del mundo para la construcción de vivienda; se estima que más del 50 por ciento de la población actual del mundo vive en casas de barro (McHenry, 1996).

Sin embargo, si las piezas prismáticas así formadas en moldes de madera, son dejadas secar al sol únicamente, se denominan genéricamente como adobes, cuyas características de resistencia y durabilidad son en general muy pobres, pero que han sido usadas históricamente y con las cuales existen millones de viviendas construidas en la actualidad. Es el comportamiento y las características de la seguridad estructural de la vivienda rural de adobe el objeto de este trabajo.

Los fenómenos naturales, en especial los sismos, nos han demostrado una y otra vez la vulnerabilidad de este tipo de estructuras. Pero el principal problema es que este tipo de estructuras se construyen en regiones rurales por comunidades de muy escasos recursos, donde los pobladores edifican sus propias viviendas, con técnicas tradicionales que pasan de generación en generación y sin ningún tipo de supervisión profesional (autoconstrucción). Por supuesto, no se realizan cálculos estructurales ni los mínimos trámites para considerar licencias de construcción.

Muchos estudios se han realizado en las últimas décadas con el objeto de entender el comportamiento estructural de los sistemas a base de mampostería. Sin embargo, dichos estudios se han enfocado a sistemas como la mampostería confinada o la mampostería reforzada interiormente, de piezas artesanales o industrializadas, pero pocos estudios experimentales se han realizado para comprender el comportamiento del adobe como material y de viviendas típicas completas construidas con el mismo.

No obstante el número tan reducido de estudios sobre las construcciones de adobe, los resultados de éstos, así como la observación de comunidades afectadas pos sismos recientes permiten conocer con certidumbre las características generales del comportamiento sismo–resistente de este tipo de estructuras, así como sus debilidades estructurales. De hecho se han conocido y se han presentado recomendaciones para la rehabilitación de este tipo de estructuras, desde hace varias décadas, a pesar de ello la falta de difusión de ese conocimiento y de dichas recomendaciones para reducir su vulnerabilidad es la responsable de que sismo tras sismo se encuentre uno con los mismos tipos de daños.

La falta de difusión de estos conocimientos va desde recomendaciones muy sencillas dirigidas a los propios usuarios, hasta estudios profundos sobre el comportamiento sísmico de la vivienda de adobe dirigidos a profesionistas como ingenieros y arquitectos. De hecho, son muy pocas las universidades que ofrecen cursos sobre mampostería y, en general, sólo se dedica unas cuantas horas a este tema dentro de otros cursos. Siendo así, es prácticamente nula la enseñanza del comportamiento de mampostería de adobe. En general, se le considera a las estructuras de mampostería poco importantes o quizá muy fáciles de diseñar si se comparan con otros materiales; en el mismo sentido, las viviendas de adobe se consideran no dignas de análisis o de detallado especial.

Adicionalmente, en los principales reglamentos de construcción del país no se incluyen requisitos especiales ni valores índice de las propiedades de materiales para edificaciones de adobe. Por tanto, los profesionales del diseño y construcción no cuentan con lineamientos que les orienten cuando se enfrentan a este tipo de estructuras, y todavía más grave, es la condición de los usuarios de bajos recursos que autoconstruyen sus propias viviendas.

La finalidad de este trabajo es reunir algunos estudios y observaciones sobre el comportamiento sísmico de estructuras de adobe, así como presentar algunas técnicas y recomendaciones para la rehabilitación de viviendas, ya sea que hayan sido dañadas o no por sismos.

En el capítulo dos se incluye una breve revisión histórica y algunas características generales del material y su fabricación como antecedentes. En el capítulo tres se describe el comportamiento observado en sismos recientes de la vivienda de adobe haciendo énfasis en los tipos de falla que más comúnmente se presentan. En el capítulo cuatro se resumen los resultados principales de una serie de estudios de campo, estudios analíticos y estudios experimentales que se consideran más relevantes para el tipo de vivienda de adobe de nuestro país. En el capítulo cinco se analizan e interpretan brevemente los tipos fundamentales de falla. El capítulo seis reúne algunas de las principales técnicas de rehabilitación aplicables a este tipo de estructuras. Finalmente en el capítulo siete se presentan unas breves conclusiones de esta revisión y se incluye un apéndice con recomendaciones simples mediante esquemas, que puede servir para desarrollar una cartilla de refuerzo o reparación de la vivienda rural de adobe.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 MARCO HISTÓRICO

En los inicios de la evolución humana, la vida del hombre como nómada, obligo a que sus primeros refugios fueran temporales. Podemos contar dentro de estos: cuevas, cavernas, protuberancias rocosas, etc. Todo aquel cobijo natural que le facilitara el estar cerca de su primera necesidad a satisfacer "el alimento". El perfeccionamiento y conocimiento de técnicas de cacería aunado a la domesticación de algunas especies animales y el desarrollo de técnicas de cultivos (agricultura) trajo como consecuencia la necesidad de mejorar y acondicionar sus viviendas a fin de permitirle pasar mayor tiempo en ellas que el acostumbrado durante su vida nómada. En algunos casos el medio favoreció su establecimiento permanente en ciertas regiones por lo que sus moradas fueron adaptadas para ello así como los materiales de que estaban constituidas. Es probable que la mampostería haya sido inventada hace mas de 15,000 años (ICA, 1999), cuando el hombre se vio favorecido por el acumulamiento de piedras cerca de peñas o en la entrada de sus moradas para conformar un lugar más adecuado para habitar y guarecerse del clima y de animales de los que podía ser presa.

El siguiente paso en la invención de la mampostería debe haber sido el uso de lodos (barro) que se empleo para asentar y estabilizar las piedras, propiciando el tener construcciones más seguras, y facilitó la construcción de muros a mayores alturas y dar un relativo sello en ellos. Existen varios vestigios de poblados prehistóricos construidos con piedras asentadas con barro desde las Islas Aran, en Irlanda, hasta Catal Hüyük, en Anatolia (ICA, 1999).

Posteriormente, el barro como material básico para la construcción, se comenzó a usar en la modalidad de tierra apisonada (llamada también tapial). Su principal debilidad es la degradación por intemperie y el agrietamiento por causa de la contracción por secado. Para reducir esta última se ideó añadir paja al material, de tal forma que ésta tomara parte importante de los esfuerzos de tensión al contraerse. Pocas construcciones de este tipo sobreviven el paso del tiempo, y sólo en zonas muy áridas donde el efecto de la humedad es prácticamente nulo. Al respecto algunos templos en Irak cuentan con más de 2000 años (Meli, 1998). Un caso más cercano son las construcciones del norte de México y suroeste de los Estados Unidos que se han mantenido en buenas condiciones hasta nuestros días.

Probablemente la invención de los bloques o ladrillos surgió de la necesidad de reducir los problemas de contracción, ya que la preparación de piezas de un tamaño manejable que pudieran ser previamente secadas al sol, permite que se complete su contracción por secado al ambiente antes de ser colocadas en los elementos constructivos definitivos (muros). Otra causa fue la necesidad de material en lugares donde la piedra natural era escasa, o por la dificultad de labrar piedras irregulares. Así surge como alternativa la fabricación de "piedras artificiales" hechas a partir de una masa de barro secada al sol. Los bloques o ladrillos de barro secados al sol se conocen como adobes y se emplean principalmente en la construcción de muros, unidos con un mortero del mismo lodo. La construcción de adobe data de más de tres milenios, y todavía se emplea en zonas rurales de algunos países en desarrollo. El vestigio más antiguo se encontró realizando excavaciones arqueológicas en Jericó, en el Medio Oriente. La unidad de barro tiene la forma de un gran pan, fabricada a mano y secada al sol; su peso es de unos quince kilogramos (ICA, 1999).

Las unidades de barro formadas a mano se han encontrado en formas diversas como se ilustra en la figura 2.1. La forma cónica es de interés, pues se repite y está presente en lugares distantes; estas unidades se encuentran en muros construidos en Mesopotamia, con una antigüedad de 7,000 años, y en la zona de la costa norte del Perú, en Huaca Prieta, con una antigüedad de 5,000 años

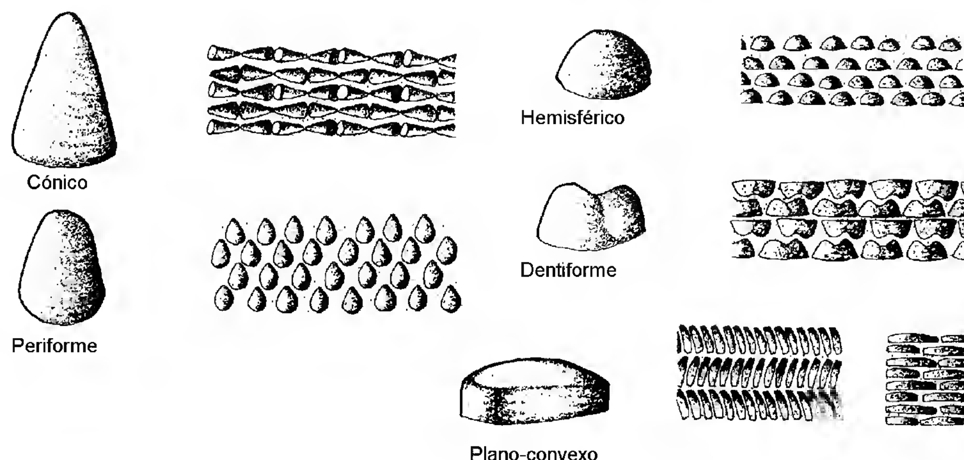


Figura 2.1 Formas de ladrillos de adobe

Las unidades de barro formadas a mano y secadas al sol y el mortero de barro constituyen el estado del arte de la construcción con mampostería en la aurora de la historia. En el cuarto milenio a.C. los sumerios, considerados como iniciadores de la civilización y de la ingeniería, inventaron entre otras cosas la irrigación, la escritura, los números, la rueda y el molde. Este último constituido por un marco de madera elemental y rústico aún se emplea en algunos países. El molde es un avance sustantivo en la construcción de mampostería y en otras actividades, pues posibilita la producción rápida de unidades prácticamente iguales.

Las primeras construcciones de adobe siguieron estrechamente la forma de las estructuras a las que limitaban los antiguos materiales, pero el poder elaborar elementos regulares facilito la construcción de techumbres curvas (en forma de túnel). De este modo la arquitectura del adobe produjo en forma incidental, una contribución a la mecánica aplicada.

El primer templo de forma sumeria fue edificado en la ciudad de Uruk (2,900 a.C.). En las excavaciones arqueológicas practicadas allí aparecen los cimientos de construcciones verdaderamente monumentales, una colina artificial y el prototipo del zigurat o torre escalonada, el cual era indispensable en un templo sumerio. Este primer zigurat está enteramente construido con adobes unidos con capas de betún.

El adobe fue llevado al horno a principios del tercer milenio antes de Cristo, para hacer ladrillos cerámicos. Para la construcción de la mampostería el ladrillo era asentado con mortero de betún o alquitrán, (sustancia abundante en el suelo del Medio Oriente) al cual se añadía arena. Esta mampostería se convirtió entonces en el material fundamental de las construcciones más importantes y posibilitó alturas crecientes de los zigurats. El de la ciudad de Ur (2,125 a.C.), con una base de 62 m por 43 m y una altura de 21 m, tenían un núcleo de adobe y un forro de mampostería de 2.4 m de espesor, hecho de ladrillos cerámicos asentados con mortero de betún, en el que se incorporó tejidos de caña. El aspecto de estos ziguarats debió ser espectacular. El Génesis relata la historia de uno de ellos, conocido como la Torre de Babel.

Históricamente la mampostería de adobe se localiza en diversas regiones del globo terrestre; entre ellas contamos el medio oriente, el norte de Africa, Europa, y el hemisferio occidental. En 1590 se hallaron construcciones de adobe el suroeste de los Estados Unidos cuya construcción fue fechada alrededor del año 1000 de nuestra era. En México la practica de la construcción con mampostería de adobe representa una alternativa económicamente viable ante los nuevos materiales que ofrece el mercado de la construcción, en especial para las familias de escasos recursos. Durante el recorrido realizado por investigadores del CENAPRED para evaluar los daños en edificaciones ocasionados por el sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999, se evidencio la vulnerabilidad de viviendas de adobe y mampostería simple localizadas en los estados de Morelos y Puebla. En el poblado de San Mateo Ozolco, Puebla, 187 casas presentaron daño, la gran mayoría fue construida con "muro de tapia", Los muros de este sistema están hechos con grandes bloques de adobe superpuestos y sin conexión alguna entre ellos como se observa en la figura 2.2. En las localidades de el Salitre y San Juan Ahuehueyo poblaciones rurales del estado de Morelos se presentaron daños en vivienda de adobe, La mayor parte de estas viviendas están compuestas por un solo cuarto del orden de 3 m de ancho por 5.5 m de largo (figura 2.3), o bien están configuradas por una serie de cuartos independientes construidos con diferentes materiales y en distintas épocas.



Figura 2.2   Viviendas de muros de tapia hechos con tierra



Figura 2.3   Vivienda de adobe de 3 ? 5.5 m

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL ADOBE

2.2.1 Selección del Suelo

El adobe es un material de gran importancia en el medio rural. Se trata de un tabique de barro sin cocer, algunas veces mezclado con fibras de distintos tipos (paja, hojas, etc.) y dejado secar al sol y al aire libre. Su resistencia a la compresión es del orden de 15 kg/cm².

La materia prima que constituye el adobe se encuentra disponible casi en cualquier parte y en grandes cantidades. Las condiciones climáticas de las diversas zonas geográficas favorecen en muchos casos las propiedades de las tierras con las que se construyen los elementos de adobe, en particular su granulometría y relación entre arena, limo y/o arcilla. Cuando el contenido de arcilla en el suelo es elevado los ladrillos fabricados suelen ser resistentes al agua y a la erosión, pero presentan baja resistencia, caso contrario ocurre cuando el contenido de arena es el que predomina.

Es deseable que las tierras destinadas a emplearse en la construcción de muros de adobe contengan arena gruesa, arena fina, sedimento y arcilla en proporciones adecuadas. Sin embargo, aunque no este presente uno de estos elementos se pueden obtener tabiques con propiedades mecánicas aceptables. Se suelen explotar los bancos de tierra lo más cercano al lugar de la edificación pero con frecuencia las tierras encontradas son combinaciones de otras con características diferentes, lo que provoca el tener que adicionar regularmente arcilla o arena de otros bancos cuando las proporciones de estas no son adecuadas para el adobe. La adición se controla elaborando y probando tabiques hasta obtener una proporción satisfactoria.

La manera más simple y recomendable de determinar si la tierra es adecuada en fabricando los tabiques y probando su resistencia. Sin embargo, existen técnicas rudimentarias que son muy útiles y que dan una idea clara al autoconstructor de la resistencia que debe tener los bloques de adobe, estas son fáciles de realizar y no requiere el uso de equipos sofisticados. Se mencionan continuación las más comunes que permiten determinar los porcentajes de arcilla y arena a fin de optimizar el proceso de adición de éstos si es el caso, y aquellas concernientes a la manera de probar los adobes.

Dos procedimientos sencillos para determinar si la mezcla de suelo es adecuada son (McHenry, 1996):

?? Se coloca dentro de un recipiente de vidrio una cantidad de suelo a la que posteriormente se agrega agua por encima del nivel de tierra y dos cucharadas de sal. Se agita la mezcla y se le permite asentarse hasta que el agua aclare. La densidad de los materiales propicia que se formen bandas con los componentes más gruesos y pesados al fondo y sedimento y arcilla por encima. Si la separación es clara, se mide la porción de arena y arcilla. Si la cantidad de arena oscila entre una a dos veces la cantidad de arcilla la tierra es aceptable para construir adobe, y no se tendrá necesidad de añadir o compensar la mezcla.

?? Se hace una mezcla moldeable con la tierra adicionando agua hasta formar una masa visualmente homogénea y se coloca en una caja de 40?40?400 mm (4?4?40 cm), sin tapa y se deja secar a la sombra como la que se ilustra en la figura 2.4, si la mezcla se abulta por un aumento en su volumen, la tierra no se recomienda para elaborar adobes. Normalmente la mezcla se encoge y agrieta en cuyo caso se suele medir la diferencia existente entre el tamaño de la muestra seca y el tamaño interior de la caja, la mezcla no debe encogerse más de 1/10 parte de su largo o sea 40 mm.

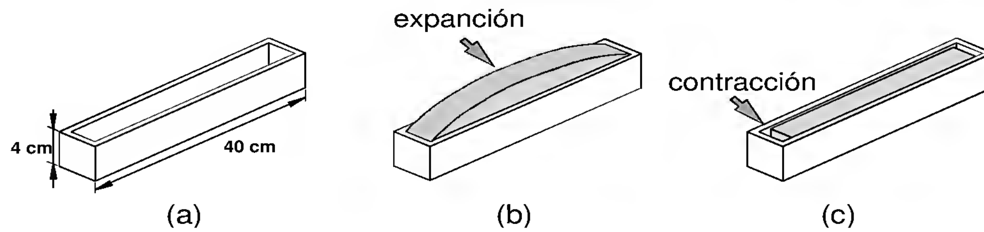


Figura 2.4 Ensaye de selección por cambio de volumen

En lo que se refiere a la resistencia de las piezas de adobe, se puede realizar en campo lo siguiente: Poner un bloque de adobe sobre otros dos y pisar con fuerza, como se ilustra en el gráfico 2.5. Si el bloque se fractura, es necesario cambiar la mezcla, es decir, agregar más arcilla.

Otra prueba sencilla y útil de la resistencia de la pieza y de la correcta fabricación es dejar caer un adobe sobre una de sus esquinas sobre una superficie firme a una altura de un metro. El impacto produce una distribución de esfuerzos hacia el interior del bloque esforzando zonas internas. Si hay zonas débiles por alguna oquedad o por agrietamientos al contraerse se quebrará por dichas zonas (figura 2.6.b).

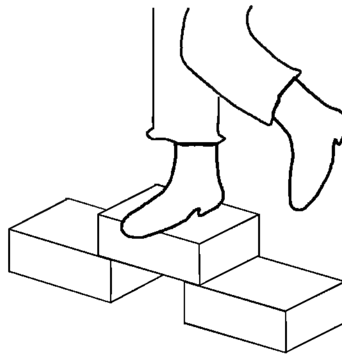
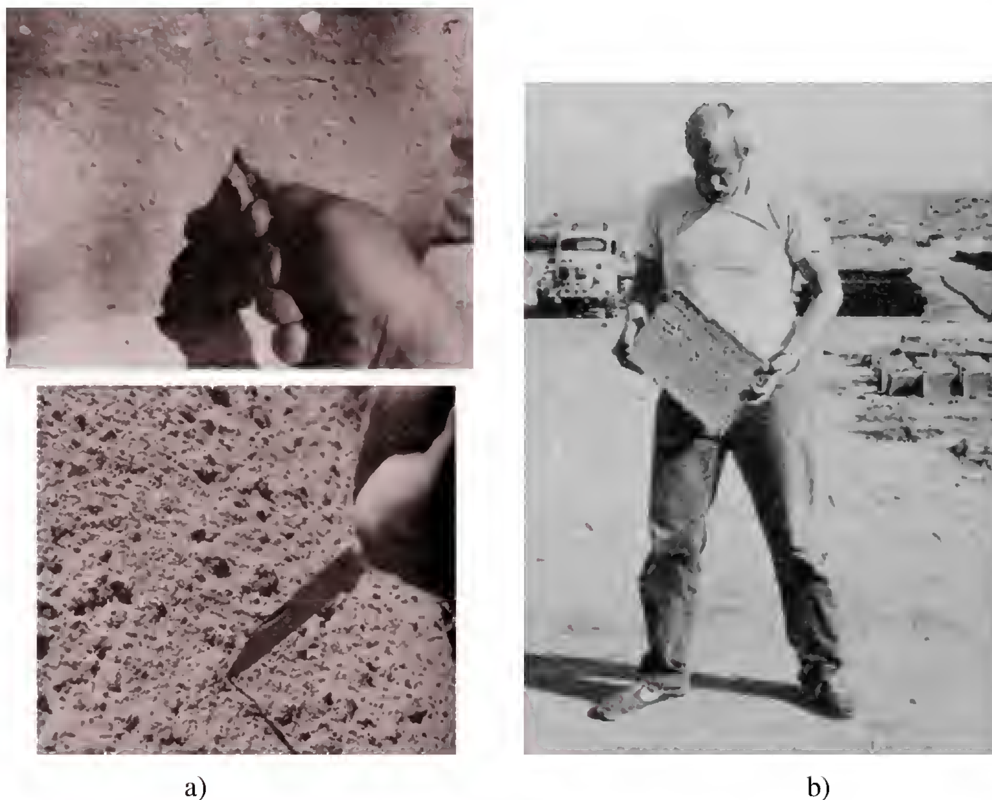


Figura 2.5 Prueba simplificada de la resistencia del adobe

Para determinar si el adobe esta seco se puede meter la punta de una navaja de bolsillo común (hoja de 9?5 mm) en un lado del adobe. Si el adobe está seco y bien hecho, la navaja no entrará más de 3 mm. En caso contrario penetrará más; esta prueba se muestra en la figura 2.6.a.



a) b)

Figura 2.6 prueba de secado y homogeneidad interna por impacto

La resistencia del abobe a la humedad se puede determinar relativamente frotando con un dedo sobre los puntos humedecidos. Esta técnica empírica resulta un buen indicador para los obreros dedicados a la fabricación del adobe para determinar el contenido de arcilla ya que este esta íntimamente relacionado con el ablandamiento de la superficie.

Uno de los problemas más importantes que se tienen con las viviendas de adobe es la degradación por intemperismo, ya sea por humedad ambiental, lluvia directa, viento o roce por acción humana o de ganado. En este caso se puede perder parte sustancial de la sección transversal de los muros reduciendo así la resistencia (fig. 2.7) además de que la condición de humedad constante reduce la resistencia de este material.



Figura 2.7 Degradación de los muros de adobe

Para mejorar la resistencia a tensión y controlar el agrietamiento durante el secado se suele añadir a la mezcla algunas fibras vegetales como paja, zacate, hojas de pino o bien estiércol. El estiércol se acostumbra usar como plastificante y para reducir las contracciones por secado (Barrios, 1986); La paja puede considerarse como un refuerzo primitivo. Puede mejorarse las propiedades de la mezcla para resistir humedad si se adiciona emulsión de asfalto o aceite quemado, así como la adición de cal apagada (Hernández, 1991). Otro material también de frecuente uso es el tabique suelo–cemento, material que parece de interés por su bajo costo. Se fabrica mezclando suelos de ciertas características con cemento portland.

2.2.2 Fabricación de las Piezas de Adobe

La elaboración de piezas de adobe se resume en los siguientes puntos:

1) Explotación de un banco de tierra, el cual se recomienda este cercano a la construcción por realizar, este puede ser producto de una excavación de sótanos, letrinas, o de nivelaciones (figura 2.8.a).

2) El material se coloca dentro de un pozo o excavación y se adiciona agua (de cualquier procedencia pero baja en sales disueltas) para su humedecimiento. El agua con demasiadas sales no se debe usar para mezclar ladrillo o mortero.

3) Se mezcla ya sea con las manos (o con los pies) o con medios mecánicos, durante este proceso se adicionan estabilizadores (emulsiones, aceites, fibras, arcilla, arena, etc.) si se requiere controlando su proporción con las técnicas ya mencionadas en la sección anterior. La tierra para ladrillos y mortero se puede mezclar a mano, sin un pozo de remojo.

4) La mezcla se transporta y vierte sobre moldes generalmente hechos de madera, previamente seleccionados y nivelados. Este proceso se realiza con carretilla o con botes. El material debe estar bien mezclado y uniforme o podrían presentarse zonas débiles en los ladrillos moldeados. La mezcla se enrasa para retirar el exceso de material sobre los moldes (figura

2.8.b). La consistencia de la mezcla se ajusta a la geometría y número de moldes por llenar. Ya que si se utilizan mezclas espesas puede que no se llenen las esquinas de los moldes.

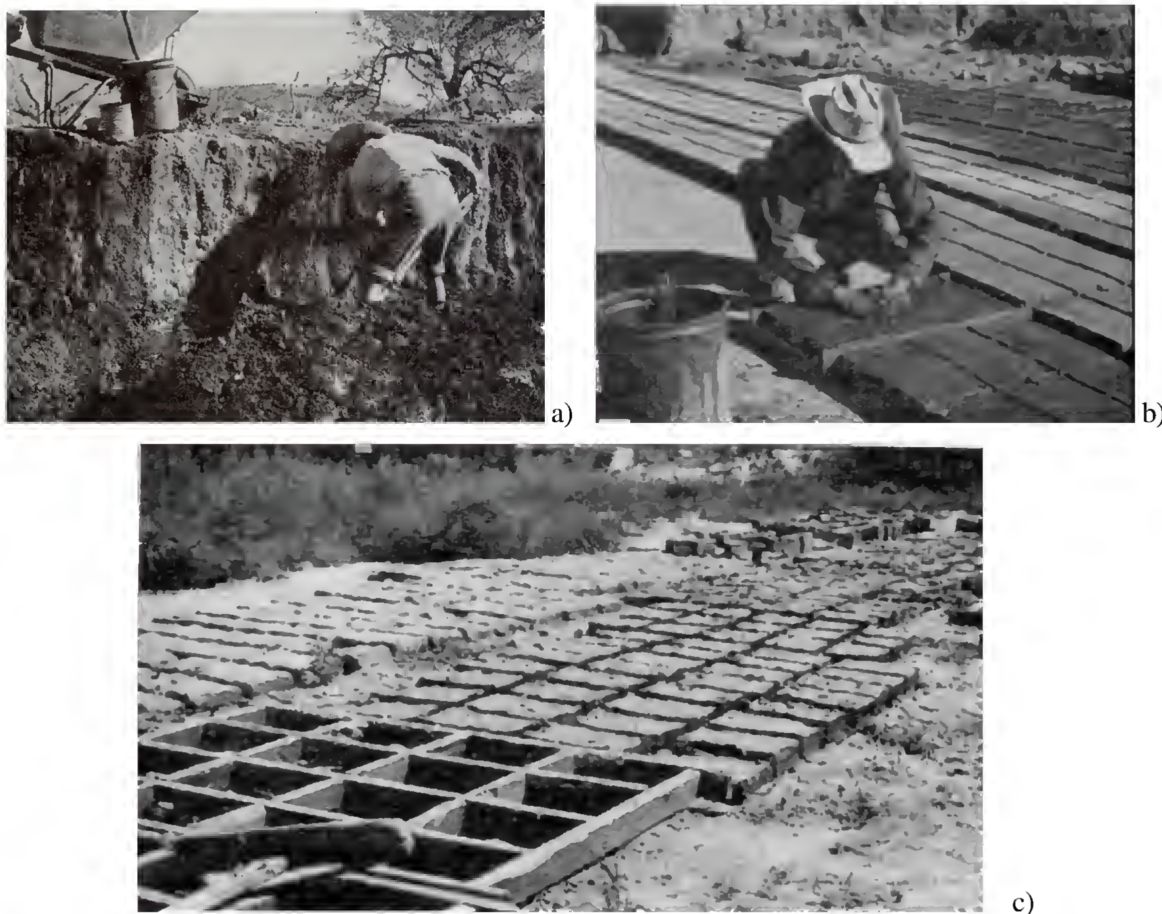


Figura 2.8 Elaboración de adobes: a) obtención de tierra, b) llenado de moldes c) desmolde y secado de adobes

5) Se deja endurecer la mezcla lo suficiente para que no pierda su geometría durante la siguiente etapa que es el retiro del molde, las piezas permanecen en su posición hasta que tengan la consistencia suficiente para manipularlos esta etapa tarda de dos a tres días (figura 2.8.c).
6) Cuando los tabiques se pueden manipular sin dañarlos se colocan de canto a fin de que quede expuesta la cara en contacto con el piso para que seque.

El tamaño de los adobes que se van a producir se puede determinar por la necesidad y el uso básico al que se van a ser dedicados variando desde 120 a 250 mm de ancho y espesor y de 150 a 400 mm de largo.

Para unir las piezas se usa un mortero a base de la misma tierra usada en las piezas, por lo que se trata de un lodo formado con la mezcla de tierra y agua. Esto permite formar un muro de material relativamente uniforme, reduciendo el problema de contracciones por secado que se presentan en muros tapial (o tierra apisonada). La adherencia del mortero está en función del

contenido de arcilla en la mezcla. Para evaluar el contenido de arcilla en campo se puede colocar en ángulo la cuchara de albañil con el material, observándose si el barro se queda pegado, señal de alto contenido de arcilla, o si el material se resbala indicando mayor presencia de arenas (ver figura 2.9)

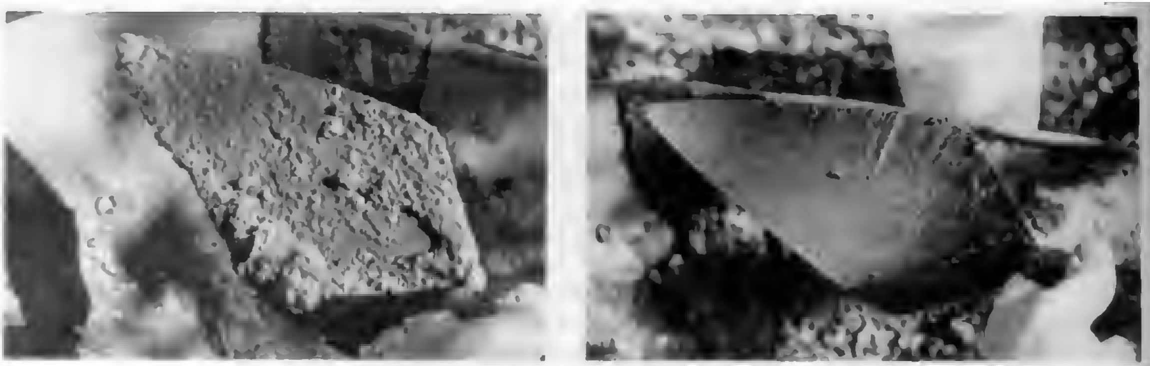


Figura 2.9 Contenido de arcilla en la mezcla para tabiques o para el mortero de pega

Como en cualquier edificación con piezas de mampostería, las recomendaciones de construcción incluyen la verificación de que cada hilada quede a nivel y a plomo, el acomodo de las piezas cuatrapeadas (el centro de cada pieza se alinea con la junta vertical entre las dos piezas de la hilada inferior) y dar liga en las esquinas o en intercepciones con otros muros alternando las piezas de cada muro en la zona de unión. Muchas recomendaciones adicionales se pueden dar, por ejemplo en cuanto a la cimentación, las aberturas (puertas y ventanas) y los sistemas de techo y cómo ligarlos adecuadamente a los muros, pero estas recomendaciones específicas son más bien material para una cartilla de construcción y quedan fuera de los alcances de este capítulo.

2.3 GEOMETRÍA TÍPICA DE LAS VIVIENDAS DE ADOBE

En un proyecto de investigación realizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, Hernández y colaboradores incluyeron una recopilación de información sobre la tipología de la vivienda así como los daños sufridos a raíz de temblores. De este estudio se describe la geometría típica de la vivienda de adobe (Hernández, 1979).

Las viviendas más comunes de este material se caracterizan por un cuerpo principal de un solo piso, con planta rectangular alargada, que generalmente tiene dimensiones de 4?8 m y ocupa un área que varía entre 30 y 50 m², frecuentemente sin muros divisorios. Generalmente los muros perimetrales no cuentan con refuerzo alguno, son de 3 o más metros de altura y tienen espesores de 400 a 600 mm (40 a 60 cm). Los sistemas de techo varían según el clima de la región. La solución más común, propia de climas cálidos o templados, es a base de armaduras de madera con teja de barro. En ocasiones se colocan armaduras completas a separaciones de 0.8 a 1 m, sobre las que se sujetan tiras de madera o "listones" para soportar la teja. En otra variante una viga robusta longitudinal descansa sobre los muros cabeceros y, en los tercios del claro, se apoyan vigas transversales. En los muros y en la viga longitudinal se apoyan elementos generalmente de madera rolliza, para recibir los listones de madera y las tejas, como se ilustra el la figura 2.10.



Figura 2.10 Sistemas de techos empleados en vivienda de adobe (Juárez, 1996, y Meli, 1998)

En climas muy cálidos se coloca un tapanco de madera para mantener un mejor aislamiento térmico. Los techos son generalmente de dos aguas con pendientes entre 25 y 50 por ciento. Son menos frecuentes los techos de una o cuatro aguas.

En regiones con climas más extremosos y de escasa precipitación pluvial se emplea el terrado (figura 2.11) en el que el techo está formado por vigas de madera separadas aproximadamente 500 mm, sobre las cuales se colocan tablas de madera que soportan un relleno de tierra de 300 a 500 mm de espesor. El techo se termina con una capa de mortero, generalmente de cal. Estos techos son de un agua, con pendiente inferior a 10 por ciento. El peso del techo de teja es de 0.59 kN/m² (60 kg/m²), y el de terrado de 4.9 kN/m² (500 kg/m²). En ningún caso el techo forma diafragma.

Frecuentemente, tanto el adobe de los muros como la madera de los techos se encuentran deteriorados por intemperización.

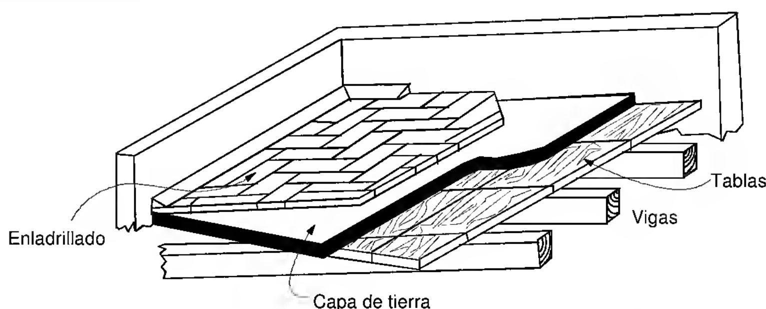


Figura 2.11 Sistema de techo mediante terrado (Meli, 1998)

2.4 NORMATIVIDAD

En el CENAPRED se realizó una recopilación y revisión de los reglamentos de construcción vigentes en la actualidad en México. Se recopilaron reglamentos y normas emitidos por algunos gobiernos de los estados así como por un número limitado de municipios, publicados en los periódicos oficiales respectivos. Esta revisión reveló que en el 50 por ciento de los estados de el país no existen normas técnicas propias para el diseño y construcción de estructuras de

mampostería, empleándose con frecuencia las vigentes en el Distrito Federal (Sánchez, 2000). Dichas normas incluyen valores índice de las propiedades de algunos de los materiales para mampostería más usuales y que fueron determinados hace treinta años en un importante estudio realizado en el Instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Meli, 1971). Dichos estudios fueron fundamentales para la elaboración de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (Hernández, 1977), y de las cuales los valores índice de resistencia siguen usándose hasta la actualidad (DDF, 1995).

Entre los inconvenientes de que en otras regiones del país se tomen los valores de las normas del Distrito Federal se puede tener el desconocimiento de las propiedades de los materiales específicas de cada región, y el uso indebido de valores de resistencia evaluados para el Distrito Federal (que, sin embargo, se consideran ya desactualizados; Hernández, 1993). Adicionalmente, no existen valores para la mampostería de adobe.

Se ha discutido ya en la introducción que los reglamentos no tienen por qué abarcar todos los materiales usados en la construcción y mucho menos es obligación dar valores nominales para poder hacer diseños sin realizar ensayes de materiales. Más que eso, un reglamento es un documento que establece los requisitos mínimos y criterios de comportamiento estructural que deben cumplir las edificaciones, no importa el material y sistema constructivo que se use. De hecho, en la sección 3.6 de las Normas para Mampostería (DDF, 1995), se dice: “Cualquier otro tipo de refuerzo o modalidad constructiva a base de mampostería deberá ser avalado por experiencia experimental y analítica que demuestre, a satisfacción del Departamento, (del Distrito Federal) que cumple con los requisitos de seguridad estructural establecidos por el Reglamento (del D.F.) y por estas Normas”.

Así mismo, cuando se establece, en la sección 2.4.2 de estas Normas, la determinación de la resistencia a esfuerzo cortante, se indica que se pueden realizar ensayes de muretes a compresión diagonal, y en casos especiales señala: “Para muros que dispongan de algún sistema de refuerzo cuya contribución a la resistencia se quiera evaluar o que tengan características que no pueden representarse en el tamaño del murete, las pruebas de compresión diagonal antes descritas deberán realizarse en muros de al menos 2?2 m”. De tal forma, los reglamentos dejan las puertas abiertas al uso de otros materiales y sistemas constructivos siempre y cuando se asegure un comportamiento consistente con el que se establece en el Reglamento.

Es razonable que en el Distrito Federal no se incluyan propiedades índice de adobe ya que, entre muchas otras razones, es prácticamente nula la construcción nueva que se hace de este material en zonas altamente urbanizadas, pero podría considerarse el estudio de este material y la incorporación en reglamentos locales. En efecto, si en un determinado municipio, esencialmente rural, predomina este tipo de construcción, tanto existente como de nuevas construcciones, parece razonable que se tome en cuenta en la formalidad de un reglamento de construcción.

No hay que perder de vista, sin embargo, que el principal inconveniente en la seguridad de la vivienda de adobe es precisamente que es producto de la autoconstrucción y en general se realiza por comunidades de muy escasos recursos. Por lo mismo no serviría de nada que se realizaran extensas investigaciones y que se dispusieran requisitos en reglamentos de construcción si éstos no van a llegar a manos de los usuarios finales, que en general no tendrían la preparación técnica para su uso.

No se pretende indicar que no sería útil realizar estudios o incluir en reglamentos locales requisitos y recomendaciones para vivienda de adobe, ya que puede haber personal capacitado como ingenieros, arquitectos, constructores, militares, o estudiantes en programas de servicio social,

que pueda participar con las comunidades en programas locales de mejoramiento de la vivienda o atender a las mismas en situaciones de desastres. Para estos casos es indispensable contar con información técnica al nivel de estos especialistas.

En todo caso, y considerando que en general son los mismos pobladores de las comunidades rurales los que deberán hacerse caso de la mejora de sus viviendas, es necesario difundir de una forma muy sencilla y didáctica las recomendaciones y soluciones para reparación o reforzamiento de la vivienda rural de adobe o de otros materiales. Entre las medidas para lograr este fin está la preparación de cartillas de autoconstrucción y rehabilitación de vivienda de bajo costo, que se puedan distribuir en las comunidades, al tiempo de capacitar a las autoridades locales para que, a su vez, capaciten a los pobladores.

Dichas recomendaciones y técnicas pueden ser también transmitidas en programas de radio y televisión local, o bien se puede preparar videos sobre estos temas para ser distribuidos en las presidencias municipales. Todo lo anterior debe ser un complemento a los reglamentos; en cierta forma, "reglamentos de construcción populares", teniendo en cuenta que lo más importante es reducir la vulnerabilidad de la vivienda de la población de menores recursos.

2.4.1 Ensayes de Materiales

Se ha descrito ya, en este capítulo, algunas pruebas específicas y simples para la selección de los materiales y la verificación de la calidad de los tabiques de adobe ya construidos. En lo que a los reglamentos de construcción oficiales se refiere, los lineamientos dados en general a las estructuras de mampostería se consideran válidos para este tipo de materiales. Sin embargo, hay que mencionar que los criterios de cálculo estructural sería válidos únicamente si la estructura en conjunto se comportara como las modernas estructuras de mampostería a las que hacer especial referencia dichas normas. En el capítulo sobre el comportamiento estructural se analiza este punto.

Los reglamentos de construcción modernos incluyen, para estructuras de mampostería, una serie propiedades de los materiales que son básicos para el diseño de estas estructuras. Los tipos de ensaye y las características que se requieren han sido propuestas en base a las que se han detectado como fundamentales en estudios experimentales. Entre estas se incluyen:

??Resistencia a la compresión de piezas (como parámetro fundamental de la resistencia);
??Resistencia a la compresión de pilas formadas por varias piezas (da una estimación más real de la resistencia del conjunto piezas y mortero);
??Resistencia a la compresión diagonal en muretes (proporciona la estimación del esfuerzo cortante resistente debido a tensión diagonal)
??Módulo de rotura (para estimar la resistencia a la tensión que, sin embargo, se desprecia para fines de diseño)
??Módulos de elasticidad y de cortante (permite el análisis y la verificación de deformaciones)
??Otras propiedades como peso volumétrico, absorción, relación de área neta a bruta en piezas huecas, etc.

Se debe comentar, sin embargo, que la determinación de las características de los materiales deberá ser congruente en todo caso con el comportamiento y modos de falla que se esperen del material y sistema estructural específico.

En general es válido considerar la determinación de la resistencia a compresión de las piezas con el ensaye que señalan las normas correspondientes (DDF, 1995). Así, la resistencia a la compresión de las piezas se calcula con el ensaye a compresión esquematizado en la figura 2.12.

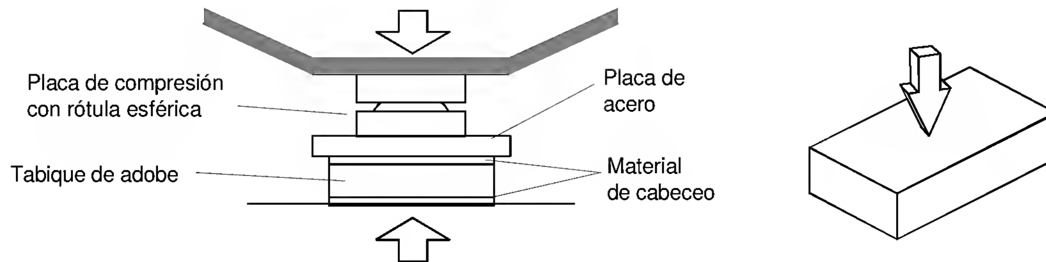


Figura 2.12 Ensaye a compresión de piezas

El esfuerzo resistente a compresión se calcula como la relación de la carga máxima entre el área de la pieza. Para garantizar que la resistencia determinada sea alcanzada, al menos por el 98 por ciento de las piezas, se usan relaciones estadísticas mediante la expresión 2.1, donde f_p* es la resistencia de diseño, c_p es el coeficiente de variación y $\bar{f}_p$ la media de los resultados de los ensayes.

$$f_p^* \; ? \; \frac{\bar{f}_p}{1 \, ? \, 2.5c_p} \qquad (2.1)$$

Para piezas de mampostería moderna, la referencia citada pide que el muestreo sea de 30 piezas; sin embargo, dicho número fue propuesto en congruencia con la dispersión en resultados de estos materiales modernos estudiados experimentalmente, por lo que en un tipo de piezas con tan pobre control como son las de adobe puede no ser aplicable. Sin embargo, en otros códigos como el reglamento de construcción de Nuevo México, EU, se establece un muestreo que debe ser de 5 piezas por cada 25,000 fabricadas.

En el caso de adobes y debido a su resistencia relativamente baja, McHenry (1996) recomienda el uso de una pasta de yeso como material de cabeceo. Éste debe de dejarse secar la muestra para evitar que la humedad del yeso afecte al material de las piezas de adobe, o como alternativa, se puede cubrir con parafina o por otro medio la superficie del adobe para evitar este contacto con la humedad del yeso.

Para determinar la resistencia a la compresión del conjunto piezas–mortero las normas estableces el ensaye de pilas formadas de no menos de tres piezas sobrepuestas unidas con el mismo mortero que se usa en la obra (DDF, 1995). En general este ensaye permite conocer el comportamiento del conjunto pieza–mortero, que difiere del de piezas solas. Sin embargo, en mampostería de adobe, el mortero está hecho del mismo material térreo que las piezas, por lo que se obtiene un elemento mucho más homogéneo. En la figura 2.13 se muestra este ensaye.

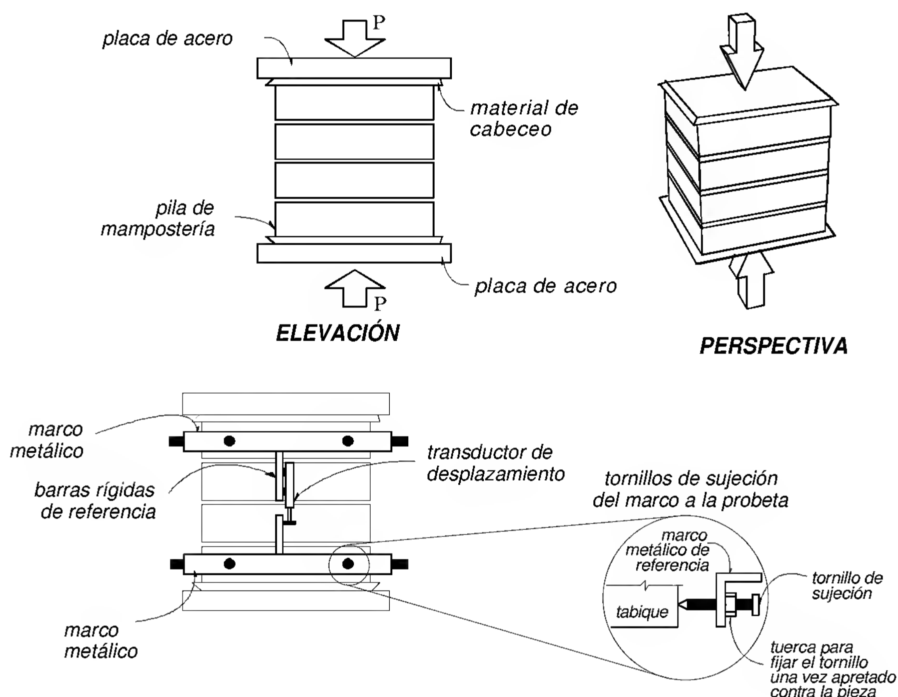


Figura 2.13 Ensaye de pilas a compresión

El ensaye en pilas permite también eliminar el efecto de restricción en las superficies de la pieza que se genera por la fricción con las placas de la máquina de pruebas, lo que le produce esfuerzos de confinamiento a las piezas cuando se prueban solas, dando una resistencia a compresión mayor de la que tendrán en un muro. Las normas de mampostería piden que la relación de altura de la pila a lado menor sea aproximadamente de cuatro, pero permiten que se encuentre entre 2 y 5 si se corrige el resultado como se indica en las mismas.

Para el caso de investigaciones más profundas, la medición de las deformaciones que permitirán obtener el módulo de elasticidad, se realizarán mediante el uso de instrumentos sujetos por un marco metálico a las piezas de la pila (fig 2.13); el detalle de sujeción del marco metálico a las piezas se debe revisar en función de la posible debilidad de éstas. Para el cabeceo de las piezas extremas se recomiendan las mismas indicaciones mencionadas anteriormente. La determinación de la resistencia se realiza con la ec. 2.2, el significado de las variables es análogo a las indicadas para las piezas donde ahora el subíndice *m* indica mampostería.

$$f_m^* \; ? \; \frac{\bar{f}_m}{1 \, ? \, 2.5 c_m} \qquad (2.2)$$

Para tener una estimación de la resistencia a fuerza cortante, se puede emplear el ensaye de compresión diagonal indicado en las normas, donde se ensaya un murete aproximadamente cuadrado, con al menos una y media piezas en su base y con el aparejo cuatrapeado (fig. 2.14). La resistencia de diseño se estima con la expresión 2.3.

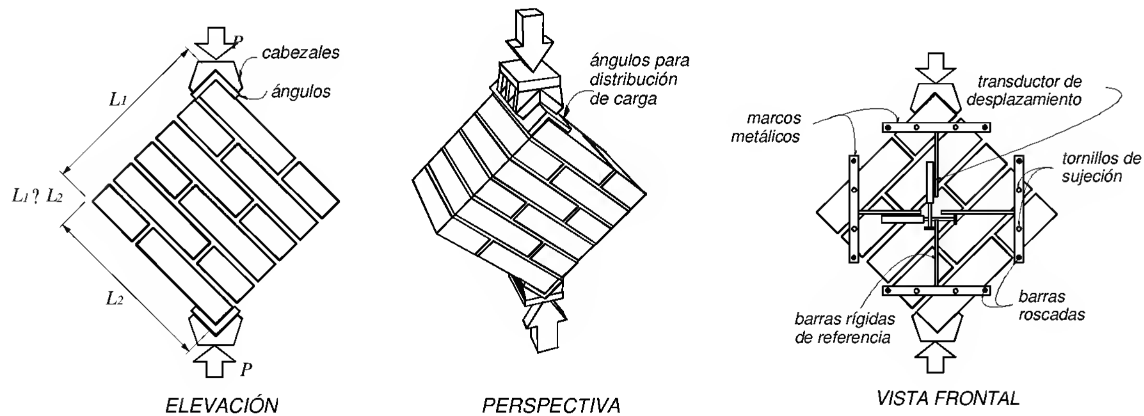


Figura 2.14 Ensaye de compresión diagonal

Si se requiere realizar mediciones para la obtención del módulo de cortante, se pueden colocar instrumentos en marcos metálicos para medir la deformación lineal en las diagonales, e indirectamente calcular con ellas la deformación angular (Meli, 1975). La resistencia de diseño, v_m*, se calcula mediante la ec. 2.3 en forma análoga a las resistencias de diseño antes descritas. El esfuerzo se calcula dividiendo la carga máxima P entre área de la diagonal (longitud de diagonal por espesor del murete).

$$v_m{}^* \; ? \; \frac{\overline{?}}{1 \, ? \, 2.5 \, c_v} \qquad (2.3)$$

Uno de las mayores dificultades para este ensaye es la fragilidad del murete durante su manejo. En un estudio realizado en el CENAPRED, se usaron flejes de plástico (tiras delgadas) para sujetar las piezas en el transporte. Otra posibilidad es realizar el ensaye con el murete horizontal, colocado sobre una placa de poliestireno ("unicel").

Otro ensaye contemplado en las Normas de Mampostería referidas es el del mortero o material para la pega de las piezas. El ensaye se realiza a compresión sobre cubos de 50 mm de lado según la norma NMX-C-061. En el caso del lodo usado para el adobe, da una estimación cualitativa de su resistencia. Se justifica este ensaye sólo en programas de investigación.

Adicionalmente a los ensayes que contempla las Normas para estructuras de Mampostería del Distrito Federal, se deberían efectuar otras pruebas como las mencionadas en este mismo capítulo. Es de especial interés la resistencia a la tensión del adobe, o más propiamente el módulo de fractura. Ya que nos enfrentamos a estructuras que en su mayoría no cuenta con elementos para tomar las tensiones, la falla por flexión en muros se podría estimar con dicha resistencia. De hecho, una de las pruebas simplificadas que se recomiendan para verificar en campo la resistencia de los tabiques de adobe es la prueba de flexión donde un adulto se para con un pie al centro de un ladrillo simplemente apoyado en sus extremos (ver fig. 2.5).

En la figura 2.15 se esquematiza la prueba me módulo de ruptura, la configuración y algunas dimensiones recomendadas (McHenry, 1996).

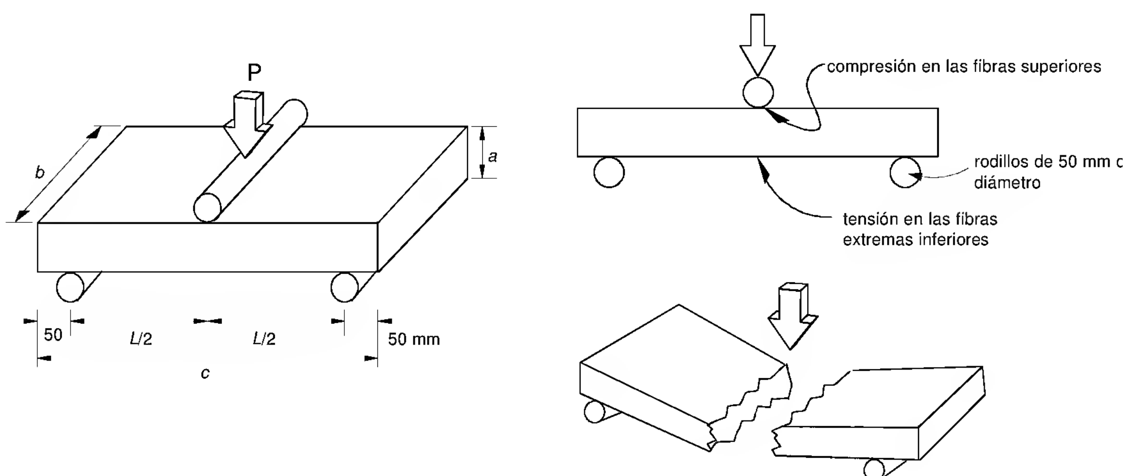


Figura 2.15 Ensaye a flexión simple de piezas para obtener el módulo de ruptura

Suponiendo un comportamiento elástico lineal, el esfuerzo de tensión en la fibra inferior (módulo de ruptura) se calcula con la ec. 2.4.

$$f_t \, ? \, \frac{3PL}{2ba^2} \tag{2.4}$$

2.4.2 Reglamento de Construcción de Nuevo México para Adobe

Uno de los reglamentos que puede ser más aplicable a las condiciones de las viviendas de adobe en el centro y norte de nuestro país es el Reglamento de Construcción de Nuevo México para Adobe, (New Mexico Building Code for Adobe, 1982). En lo que sigue se hace mención de los puntos de mayor importancia de este reglamento.

En la sección de aspectos generales se indica que la mampostería con unidades de barro no cocida no se deberá usar en edificios de más de dos pisos. La altura de los muros sin soporte lateral no deberá ser mayor a 10 veces su espesor. También se permite que muros exteriores, sostenidos lateralmente con soportes colocados con separaciones no mayores de 7.2 m puedan tener un espesor mínimo de 250 mm si se trata de una sola planta o de la planta superior, y de 350 mm si es la planta baja de una construcción de dos niveles. Para muros de carga interiores el espesor mínimo que se permite es de 200 mm.

En cuanto a los materiales, se indica que para considerar aceptable la tierra se debe hacer un adobe de muestra y permitir su curación al aire libre protegido de la humedad. El aspecto final del adobe deberá estar libre de deformaciones o agrietamientos excesivos. Se recomienda que la mezcla de arena y arcilla no contenga más de 2 por ciento de sales solubles en agua.

Se señala que los adobes estabilizados son aquéllos resistentes al agua hechos de tierras a las que se agregan ciertos compuestos durante el proceso de manufactura para limitar la absorción del agua por parte del adobe, por lo que los muros exteriores construidos con este material no necesitan protección adicional. La prueba requerida es que un cubo de 100 mm de lado, recortado de una unidad de adobe de prueba seco, no absorba más de 2.5 por ciento de humedad cuando se le coloca en una superficie porosa saturada con agua durante siete días.

Los adobes que no cumplan con las especificaciones anteriores de absorción de agua están prohibidos para su uso en la base de los muros, a menos de 100 mm de altura por encima del nivel de piso terminado. Se pueden usar siempre y cuando no sea en la base de los muros y que se protejan en caso de ser muros exteriores.

Se deberán realizar las pruebas descritas seleccionándose como muestra representativa cinco piezas por cada 25,000 adobes. El contenido de humedad no deberá ser mayor de 4 por ciento; ninguna unidad deberá contener más de tres grietas por contracción, y ninguna de éstas deberá rebasar los 50 mm de longitud ni 3 mm de ancho.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se indica que la resistencia a compresión promedio de las piezas deberá ser al menos de 2 MPa (21 kg/cm² o 300 psi), determinado de acuerdo a la norma ASTM C-67. Se admite que una de cada cinco muestras tenga una resistencia menor, pero sin pasar de 1.7 MPa (17.6 kg/cm² o 250 psi).

En cuanto al módulo de ruptura se admite un promedio de 0.34 MPa (3.5 kg/cm² o 50 psi). El tipo de prueba es el descrito anteriormente (fig. 2.15), donde la pieza deberá tener dimensiones de 100?250?300 mm apoyada sobre soportes cilíndricos de 50 mm de diámetro colocados a 50 mm de cada extremo. La carga se aplica a razón de 2.22 kN por minuto (227 kg/min. o 500 lb/min) hasta la ruptura. El módulo de ruptura se calcula con la ec. 2.4 anteriormente presentada.

Para el mortero se permite el uso de la misma tierra con que se fabrican los adobes, o también se puede usar mortero convencional con cemento, cal y arena (Tipos M, S, N según las normas norteamericanas). Las capas de mortero deberán ser "espesas y lodosas" dejando juntas abiertas en la cara del muro donde se vaya a empastar la superficie. Ningún adobe deberá ser colocado en el muro hasta que se haya curado completamente.

En cuanto a la cimentación, no se permite usar adobes en los cimientos o muros de sótanos. Este reglamento pide que se usen cimientos corridos de concreto para estructuras importantes; y el cimiento deberán sobresalir 150 mm arriba del nivel de piso terminado.

Adicionalmente se dan algunos lineamientos para muros de tierra prensada, entre los cuales destaca: comprimir la tierra húmeda en capas de 150 mm; el contenido de humedad y los moldes deben ser "los apropiados" para una construcción adecuada; y se puede permitir la construcción continua con tierra apisonada antes de completar el proceso de curación si el método de compresión son los adecuados.

2.4.3 Otros Reglamentos

McHenry (1996), resume también los requisitos que señala el Código de construcción uniforme (Uniform Building Code, 1982), en lo referente a estructuras de adobe. En su sección 2405, referente a mampostería de arcilla no cocida, señala que no se deberán usar en edificios con más de un piso de altura; que la altura no apoyada del muro no deberá tener más de 10 veces el espesor del muro y que en ningún caso los muros de apoyo deberán tener menos de 400 mm de espesor. La cimentación de todo muro deberá sobresalir 150 mm arriba del nivel de piso terminado.

Se indica que en el momento de la colocación, todas las unidades deberá estar limpias y húmedas en su superficie y deberán haber sido estabilizadas con asfalto emulsificado de acuerdo con el Estándar UBC núm. 24-14. Para la colocación todas las juntas deberán estar llenas de

mortero tipo M o S. Y se indica que toda mampostería con unidades de arcilla no cocida deberá construirse de manera tal que los esfuerzos no excedan ciertos límites que se señalan en este código (tabla núm. 24-B).

Como referencia adicional, el mortero timo M tiene una relación cemento:cal:arena de 1:¼:3½; el tipo S de 1:½:4½; el tipo N de 1:1:6 y el tipo O de 1:2:9, todos ellos en volumen. (ACI 530-99, UBC-97). Los morteros N y O sólo pueden usarse en zonas de bajo a mediano peligro sísmico (zonas 0, 1 y 2 del UBC). En zonas 3 y 4 (alto peligro) sólo se pueden utilizar morteros M y S, siendo el S el que más se utiliza por ser menos rígido.

CAPÍTULO 3

COMPORTAMIENTO OBSERVADO DE LA VIVIENDA DE ADOBE

3.1 GENERAL

Son varios los factores que ponen en riesgo la seguridad estructural de las viviendas de adobe, entre los cuales se cuentan el deterioro por degradación del material o por erosión, especialmente debido a la presencia de humedad, y los fenómenos naturales como inundaciones, viento y, en especial, por el fenómeno sísmico, cuyo efecto en la vivienda de adobe es el objetivo de el presente trabajo.

En México merece especial atención el problema de la seguridad contra sismo ya que la parte sur oriente de nuestro país es una región de alta actividad sísmica. En la figura 3.1 se muestra la regionalización sísmica del país; donde la zona identificada como D constituye una de las regiones de más alto riesgo sísmico del planeta (Hernández, 1979). Las zonas C y B, aunque de menor actividad sísmica, pueden estar sujetas a temblores que resulten destructivos para las viviendas rurales típicas.

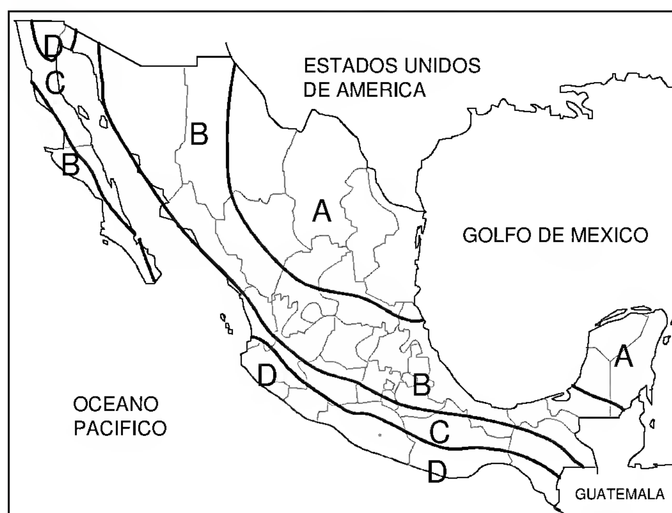


Figura 3.1 Regionalización sísmica de la República Mexicana

El hecho es que, si bien el conocimiento en sismología, en la instrumentación sísmica y en estudios analíticos de todo tipo, han tenido un gran avance con el paso de las últimas décadas, también es cierto que sismo tras sismo y década tras década, se ven y se siguen viendo los mismos tipos de fallas en las estructuras de adobe. Se ha discutido ya que el problema no es que no se sepa cómo se comportan estos edificios, ni que se tengan que hacer más estudios analíticos y experimentales, puesto que las soluciones al problema de la vulnerabilidad de estas estructuras ya se han planteado, tras estudios de laboratorio (Hernández, 1979), y se tiene el medio de difundirlos a la población mediante cartillas para autoconstrucción para distribución entre los pobladores (SAHOP, 1977, ver Apéndice B). Sin embargo, ha fallado precisamente la difusión de estas técnicas.

Aún así, los eventos sísmicos intensos han permitido llevar a cabo inspecciones de campo que permiten profundizar en el conocimiento del comportamiento estructural de las construcciones

de adobe, o bien comprobar, nuevamente, cuáles fueron los tipos de fallas que se presentan. Se puede mencionar que estos fenómenos (que en cierta forma resultan ser el laboratorio más grande y preciso), permiten también evaluar el comportamiento de técnicas de reforzamiento o de rehabilitación de estructuras dañadas.

Múltiples experiencias sísmicas comprueban la debilidad de la vivienda de adobe. En los temblores de Puebla y Orizaba de 1973 decenas de miles de viviendas fueron destruidas o seriamente dañadas (Hernández, 1979).

En los temblores de intensidad moderada ocurridos en Chiapa de Corso en 1974, si bien el número de colapsos fue reducido, ocurrió daño estructural en algunos miles de viviendas.

El caso más significativo es el temblor de Guatemala de 1976 en que, por el colapso de cerca de 25,000 viviendas, la mayoría vivienda de adobe similar a las que se encuentran en gran parte de México, murieron más de 20,000 personas (Hernández, 1979).

3.2 EVENTOS SÍSMICOS RECIENTES

Se ha reunido en esta sección la descripción de los daños observados por brigadas de reconocimiento que han viajado a diversas comunidades afectadas por eventos sísmicos recientes. Cabe reflexionar que en muchas ocasiones, estos grupos de reconocimiento arriban a las poblaciones en el momento de mayor angustia y zozobra de los habitantes, los cuales siempre reciben gustosamente y esperanzados a los grupos de especialistas que llegan a inspeccionar. Lamentablemente estos grupos, generalmente académicos, solamente evalúan y reúnen información y, cuando más, dan recomendaciones y dictámenes no oficiales. Aun así, el valor de estas visitas radica en el conocimiento y, en especial, de la difusión a nivel de la comunidad ingenieril, de la descripción de los daños sufridos por las estructuras. Además de los grupos de inspección del CENAPRED se han formado numerosos grupos académicos a los que se debe hacer un reconocimiento como son los de la Universidad Autónoma Metropolitana, del Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería de la UNAM, así como profesores e investigadores de otras universidades, principalmente en los estados que se ubican en la región de mayor actividad sísmica en México. La albor de difusión en revistas técnicas y en los congresos nacionales de ingeniería sísmica y estructural, así como presentación de conferencias y seminarios permiten una efectiva difusión.

Otros trabajos también son fuente formidable de información, recolectando los estudios y experiencias de diversos investigadores, académicos y otros especialistas. Baste mencionar como ejemplo informes como los de los sismos de México de 1985 (ICA, 1988; Masaki, 1996; entre otros) y el sismo de Manzanillo de 1995 (Tena, 1997).

En opinión de los autores, es de suma importancia que se continúe e intensifique esta labor de reconocimiento, análisis y difusión de las lecciones aprendidas en los sismos; y debe apoyarse esta actividad tanto en el ámbito nacional como en internacional. Con dicha labor se retroalimenta y enriquece el conocimiento del comportamiento de las estructuras, y proporciona una herramienta para proponer y tomar acciones contundentes para reducir la vulnerabilidad, en este caso, de la vivienda rural. Adicionalmente se recomienda que se extiendan estos reconocimientos mediante expertos en la evaluación del impacto social y económico, ya que sólo con estudios y datos fieles y oportunos de la magnitud del desastre, será posible orientar los esfuerzos futuros a programas efectivos para realmente reducir estos impactos.

3.2.1 Ometepec, 1995

Este sismo, con magnitud M_s=7.3, se originó en las costas de Guerrero el día 14 de septiembre de 1995. Las afectaciones se tuvieron principalmente en la ciudad de Ometepec y algunas poblaciones aledañas ubicadas cerca de la región epicentral. Los efectos este fenómeno fueron evaluados por Sordo y colaboradores, pertenecientes a las universidades Autónoma Metropolitana, Autónoma de Guerrero, Autónoma del Estado de México y Autónoma de Chiapas (Sordo, 1996). Se confirmó que numerosas edificaciones construidas con muros de adobe y que no contaban con ningún tipo de refuerzo adicional fueron las más afectadas. Más de 800 casas resultaron seriamente dañadas o destruidas en un radio de 25 km del epicentro (fig. 3.2), lo que produjo un saldo de más de 5000 damnificados.

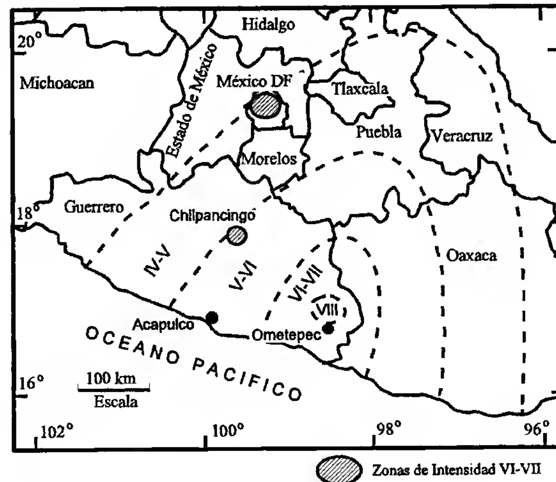


Figura 3.2 Mapa de intensidades de Mercalli Modificado (Sordo, 1996)

La actividad sísmica en esta zona se genera principalmente por efectos de subducción de la placa de Cocos bajo la placa de Norteamérica, donde se han producido numerosos eventos en periodos cortos, así como grandes sismos con periodos de recurrencia superiores a 75 años. Los sismos como el que se menciona tienen periodos de retorno de aproximadamente 12 años; así el sismo importante más reciente, con magnitud de 7.0, ocurrió en 1982 (Sordo, 1996).

Las poblaciones típicas de la región epicentral, al sur del estado de Guerrero, son pequeñas comunidades rurales carentes de caminos, donde los habitantes construyen sus propias viviendas consistentes en un cuarto rodeado de muros de carga a base de bloques de adobe, sin contar con más elementos para resistir las fuerzas sísmicas. En las comunidades con mayores daños, el bloque de adobe está expuesto directamente a las condiciones ambientales. Se informó además que, previo al sismo, ocurrieron intensas lluvias en la zona. De la inspección de la zona se determinó que 20 por ciento de las viviendas de adobe se colapsaron, y 75 por ciento fueron severamente dañadas. Las casas menos afectadas son construcciones relativamente nuevas, hechas de adobe de buena calidad en términos de mezclado y mantenimiento.

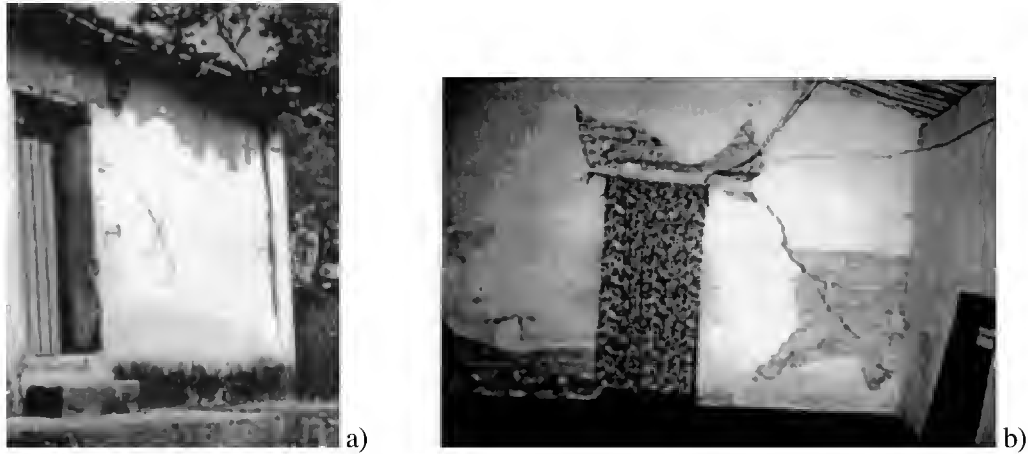


Figura 3.3 a) Grieta vertical en las esquinas, b) grieta por tensión diagonal que se extiende hasta la esquina de la abertura (Sordo, 1996)

En la mayoría de los casos se pudo observar agrietamiento vertical, que se ha atribuido a la falta de liga en la unión de las esquinas de los muros, provocado por la flexión de los muros hacia fuera de su plano (fig. 3.3.a). Otro tipo de falla fue la concentración de grietas cerca de las esquinas de las aberturas para puertas y ventanas. (fig. 3.3.b).

En cuanto al sistema de techo, se pudo observar que la mayoría de las construcciones tenían un sistema de techo apoyado en una viga cumbrera de madera, en la dirección longitudinal, que soporta una serie de viguetas de madera que sostienen las tejas de arcilla. La concentración de esfuerzos por la descarga de la viga de cumbrera, sumado a la fuerza sísmica por la masa del techo ocasionó agrietamiento vertical en los muros transversales (fig. 3.4.b).

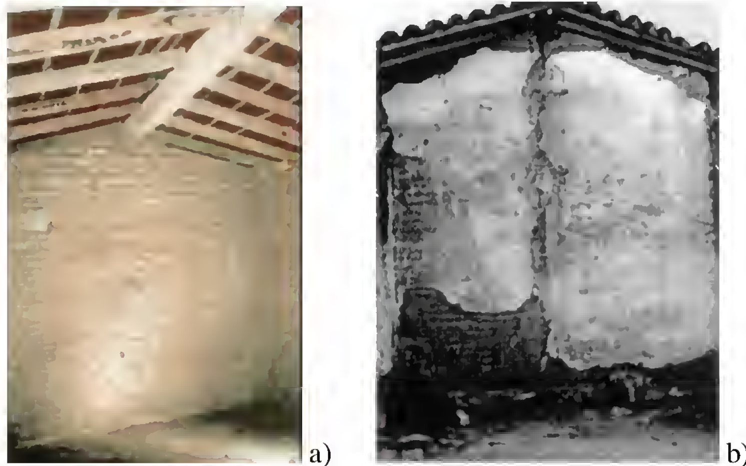


Figura 3.4 a) Sistema de techo típico, b) agrietamiento vertical en muro cabecero (Sordo, 1996)

También las iglesias locales, construidas de adobe, sufrieron agrietamientos importantes durante el sismo, con incluso algunos colapsos. Los daños se concentraron en las torres y domos de las iglesias, e incluso se abrieron grietas que habías sido reparadas en eventos anteriores.

No obstante el daño generalizado en la zona afectada, en las viviendas construidas con piezas de adobe que contaban con algún tipo de refuerzo vertical, principalmente polines de madera, exhibieron un mejor comportamiento. En Ometepec, algunas de las casas de adobe que no sufrieron daños de consideración están provistas de un sistema de elementos de concreto reforzado horizontales y verticales confinando los muros, que mejoraron sustancialmente su respuesta sísmica (fig. 3.5). El comportamiento de dichas construcciones fue satisfactorio, reduciéndose el daño a grietas diagonales menores. en muchas ocasiones, dichos elementos fueron agregados después de un temblor que causó daños en la vivienda. La intuición y experiencia de la gente de la localidad son generalmente la guía principal de estas técnicas de reparación.



Figura 3.5 Vivienda de adobe reforzada con elementos de concreto

3.2.2 Manzanillo, 1995

El sismo que el 9 de octubre de 1995 se presentó frente a las costas de Colima, a unos 15 km del puerto y ciudad de Manzanillo, tuvo una magnitud $M_w = 8$. El sismo afectó las áreas suroeste de Jalisco y la norte de Colima (fig. 3.6). se realizó una inspección de reconocimeinto a las zonas afectadas. Los sismos anteriores más importantes, con magnitudes superiores a 7.5, ocurrieron en 1806, 1818, 1900 y 1932, este último con magnitud de 8.2 (Juárez, 1996).

Más de 7,200 viviendas fueron afectadas por el sismo, de las cuales 5600 estaban localizadas en la ciudad y puerto de Manzanillo. En las zonas urbanas los tipos de piezas más empleados para la construcción de muros son de barro rojo recocido y tabicones de concreto, aunque no es una práctica la construcción de elementos confinantes de concreto. La vivienda rural está constituida principalmente por muros de adobe o de muros capuchinos con horcones. Las techumbres son de palapa, lámina o teja.



Figura 3.6 Mapa de intensidades de Mercalli Modificadas (Juárez, 1996)

Juárez y colaboradores reportaron la observación de dos fallas típicas: la primera fue el agrietamiento vertical en las esquinas (fig. 3.7) que atribuyen a la falta de conexión de los muros entre sí, propiciando la fractura y eventualmente el colapso de los muros fuera de su plano; y la concentración de esfuerzos en las aberturas de puertas y ventanas ocasionando el agrietamiento de los muros (Juárez, 1996).



Figura 3.7 Agrietamiento vertical en esquinas (Juárez, 1996)

Alcocer y colaboradores, reportaron daños fallas por tensión diagonal en muros de adobe y capuchinos con horcones en viviendas rurales (Tena, 1997).



Figura 3.8 Daño en aberturas por falta de confinamiento (Tena, 1997)

Sin embargo, en especial para este sismo, se pudo constatar que algunas edificaciones que contaban con elementos de confinamiento de madera tuvieron un buen comportamiento (fig. 3.9.b).



Figura 3.9 a) Colapso parcial b) Construcción de adobe confinada con polines de madera (Tena, 1997)

3.2.3 Villaflores, Chiapas, 1995

La geometría de las estructuras de adobe en esta región es muy similar a las descritas para Guerrero y Jalisco, excepto que el sistema de techo emplea vigas de madera en toda la periferia de los muros, además que existen troncos de poco diámetro que se usan como vigas de soporte del techo.

El tipo de falla es similar al descrito en otros sismos. Según describen Juárez y Sordo, las principales fallas fueron el agrietamiento vertical en las esquinas de conexión entre muros perpendiculares, lo que provocó la falla del muro fuera de su plano (fig. 3.10); la concentración de esfuerzos en las aberturas de los muros; y el agrietamiento de los muros por fuerzas cortantes. Se reconoció que el sistema de techo no indujo fallas como en el caso de Ometepec y de la zona epicentral de Manzanillo, sin embargo fue muy comun el desplome del techo al interior de la vivienda (Juárez, 1997).

Se determinó que el adobe utilizado en la zona epicentral de Villaflores era de mejor calidad; se consideró que el material fibroso utilizado da mayor consistencia al tabique y contribuyó al buen comportamiento de estas estructuras.



Figura 3.10 Falla en la conexión de esquina (Tena, 1997)

3.2.4 Caleta de Campos, 1997

Una estadística de los daños registrados en estas edificaciones a raíz del sismo del 11 de enero de 1997, con magnitud Ms = 7.2 que afectó a varias comunidades en el Estado Michoacán, evidenció la alta vulnerabilidad de las construcciones de adobe. De las 3020 estructuras revisadas el 97 por ciento estaban destinadas a vivienda, estructuradas a base de muros de muros confinados de tabique o muros de adobe. De las viviendas el 60 por ciento lo constituyeron viviendas de adobe. De la muestra inspeccionada, el 74 por ciento exhibió daños considerados como reparables y en un 25 por ciento se observó daño severo o derrumbe de la estructura (Rodríguez, 1997).

3.2.5 Tehuacán, 1999

Este sismo ocurrió el 15 de junio de 1999, con una magnitud M 6.7 (Mw 7.0). El epicentro se ubicó aproximadamente a 20 km al sur-suroeste de la ciudad de Tehuacán, Puebla y también a unos 55 km al noreste de la ciudad de Huajuapan de León, Oaxaca, donde se registró un temblor de magnitud Mw 7.0 el 24 de octubre de 1980.

Durante el sismo de Tehuacan de 1999 fueron destruidos o afectados seriamente un número apreciable de viviendas, escuelas, algunos centros de salud y un cierto número de edificios públicos. Los daños más significativos se registraron en las casas de adobe, aunque también se registraron daños importantes en un buen número de edificios de más de un piso, básicamente debido a prácticas constructivas inadecuadas.

En la figura 3.11 se presentan las isosistas hasta el grado VI en la escala de Mercalli Modificada, así como la ubicación y fecha de los sismos ocurridos en los últimos 150 años con magnitud mayor a 6.5. Se puede afirmar, entonces, que el período de retorno medio de temblores de magnitud mayor a 6.5 en la zona es de 20 a 30 años (Alcocer, 1999). Así se establece que este evento no fue extraordinario, sino que se ha presentado en el pasado un buen número de sismos de magnitud y consecuencias iguales o mayores, y debe esperarse que lo mismo siga sucediendo en el futuro.

El temblor produjo intensidades de moderadas a altas en el epicentro, causando daños de consideración en algunas ciudades y poblados del sur de Puebla y norte de Oaxaca; y en mucho menor medida, en el sur de Morelos y en los estados de Tlaxcala, México, Veracruz y Guerrero. Debido al mismo se vieron afectados un gran número de edificaciones, principalmente iglesias, El sismo destruyó o afectó seriamente un número apreciable de viviendas, escuelas, algunos centros de salud y un cierto número de edificios públicos. Los daños más significativos se registraron en las casas de adobe.

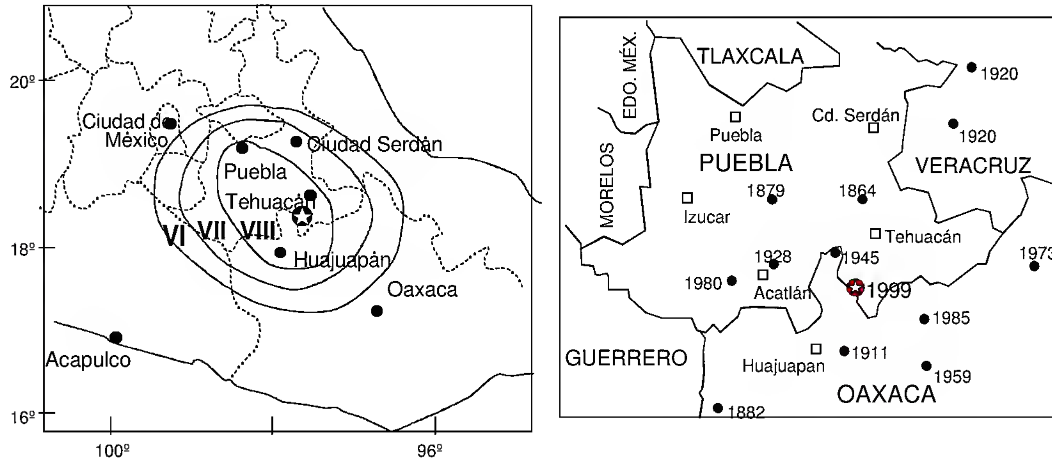


Figura 3.11 Isosistas (Gutiérrez, 1999) y mapa con la ubicación de los sismos con magnitud mayor a 6.5

En un recorrido de evaluación realizado por personal del CENAPRED se siguieron dos rutas que incluyeron 20 poblaciones. No se hizo una descripción generalizada de las vivienda de adobe, sino que se detalla el comportamiento de estructuras representativas de los poblados visitados (Alcocer, 1999).

Algunas de las viviendas de adobe en la población el Salitre, se encontraron construidas sobre material blando de la margen de arroyos. Se identificaron viviendas constriudas con muros de carga de adobe repellados con mortero. El sistema de techo es una retícula de rollizos y vigas de madera sobre la que descansan láminas corrugadas de cartón. En el caso de muros de bloque se tiene losa maciza de concreto. La altura típica de entrepiso es de 3 m.



Figuras 3.12 Daño en la intersección de muros y tendencia al volteo fuera de su plano, El Salitre, Puebla (Alcocer, 1999)

De manera similar al daño observado en otras poblaciones y en otros sismos, los muros de adobe sufrieron daño en sus intersecciones y por movimientos fuera de su plano, a pesar de contar con un repellado de mortero en ambas caras, esto se debió a la tendencia al volteo fuera de su plano de los muros (fig. 3.12).

Otras viviendas se encuentran cimentadas sobre boleos y cuentan con muros de adobe, de tabique de barro recocido y de bloque de concreto. Algunas viviendas fueron modificadas mediante la adición de habitaciones construidas a base de muros de mampostería confinada de tabique de barro (fig. 3.13). También se aprecia que el sistema de techo original, usualmente tejas de barro, fue reemplazado por una losa maciza de concreto que se extendió hacia las nuevas habitaciones. Es de particular interés que algunos de los muros, inicialmente de adobe, fueron aumentados en su altura mediante mampostería de tabique de barro. Aparentemente se trata de una práctica frecuente en el poblado.

Los daños en esta estructura se concentran en los muros de adobe. Se apreciaron grietas inclinadas que arrancan de la base de los muros, cerca de las aberturas (fig. 3.13). No hubo daño alguno en los muros de tabique de barro.



Figuras 3.13 Detalle del cambio de material de construcción en muros, El Salitre, Puebla (Alcocer, 1999)

En San Juan Ahuehueyo la vivienda típica se componen por lo general por un solo cuarto de 3 m de anchura y 5.5 m de largo usada como habitación de una familia. Los cuatro muros perimetrales son de piezas adobe de 50 cm de longitud, 30 cm de anchura y 10 cm de altura. Los muros se encuentran desplantados sobre un cimiento de boleos pegados entre sí mediante arcilla. El sistema de techo es una retícula inclinada de rollizos y vigas de madera que soportan láminas corrugadas de metal. Es importante señalar un caso en que que el único muro de adobe que se encontraba confinado por castillos de concreto de sección cuadrada de unos 20 cm por lado y una dala de cerramiento, resultó sin daño. Este refuerzo se había iniciado días antes del sismo.

El daño que se observó en la vivienda se concentró en el muro paralelo al único confinado. Se presentó una grieta vertical en la intersección de dicho muro con otro perpendicular (fig. 3.14.b). Este agrietamiento se asocia con el movimiento fuera del plano del muro sin confinamiento. Asimismo, se presentaron algunos agrietamientos inclinados en el muro con ventana. Este agrietamiento va de una de las esquinas de la abertura hacia la parte superior de la dala de confinamiento del muro perpendicular. Este tipo de daño se explica por un deficiente confinamiento tanto de la abertura como del propio muro. Obsérvese que existen algunos boleos alrededor de la ventana empleados para rellenar espacios dejados por las piezas de adobe (fig. 6.45).



Figura 3.14 Vivienda de adobe dañada San Juan Ahuehueyo, Puela (Alcocer, 1999)

En San Mateo Ozolco se es muy común el uso de muros tapiados. De acuerdo con datos recabados en la comunidad, 187 casas tuvieron daños durante el sismo, lo que significa que más de 500 personas tuvieron que ser desplazadas o albergadas. Cuatro personas fallecieron. Para fines comparativos conviene indicar que el número de habitantes en San Mateo Ozolco es de alrededor de 3800.

Los daños en vivienda se presentaron exclusivamente en viviendas de tierra. Según los vecinos, todas ellas estaban construidas con muros de tapia que databan de principios de siglo. Los muros de este sistema están hechos con grandes bloques de tierra superpuestos y sin conexión alguna entre ellos. Los bloques son colados en sitio con adobe usando cajones de madera a manera de cimbra. Una vez que el adobe se ha secado, se retiran las tapas del cajón. Las caras de los bloques, sean verticales u horizontales, sirven como cimbra de los nuevos bloques que son colados contra el inmediato anterior o inferior. Las dimensiones típicas de los bloques son 1.9?1.7?0.5 m. Comúnmente los muros estaban construidos por dos hiladas de bloques. El sistema de techo de las viviendas colapsadas estaba hecho de un enramado de rollizos y vigas, simplemente apoyado sobre los muros, que a su vez soporta tejas de barro. Este sistema constructivo se empleaba comúnmente para vivienda formando espacios de alrededor de 4 m de largo por 3 m de ancho.

La falla parcial o total de las viviendas fue causada por el volcamiento de los bloques hacia dentro de la vivienda. Consecuentemente, el techo cayó. En varias de las construcciones colapsadas se apreció que sólo los bloques de la segunda hilada cayeron; es posible que los de la primera hilada estuvieran "empotrados" en el terreno.



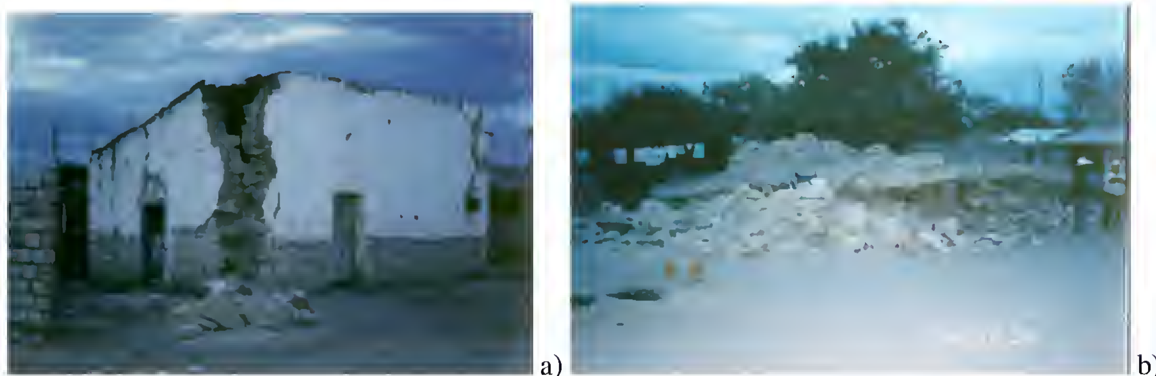
Figura 3.15 Muro de tapia, y colapso de este tipo de vivienda, San Mateo Ozolco, (Alcocer, 1999)

En Santa María la Alta, Puebla, la mayor parte de las casas son de un nivel, autoconstruidas. El sistema estructural es a base de muros de mampostería simple de piedra y adobe, con losas de techo de concreto reforzado sobrepuestas o bien de lámina y armadura de madera. El poblado tiene un trazo de calles muy. La población cuenta con alrededor de 800 viviendas, la mayoría de ellas conformadas por uno o dos cuartos, en 300 de las cuales se registró algún tipo de daño.

Los daños observados en las viviendas fueron agrietamiento inclinado en muros; agrietamiento vertical en las esquinas y zonas de unión con muros ortogonales; y colapso total de la estructura (fig. 3.16).

El origen de los daños fue debido básicamente a la falta de continuidad en el sistema, que permite el movimiento relativo e independiente entre los muros y el techo. Además, el daño fue agravado por el gran peso de la estructura de techo en algunos casos. Dentro de las 300 casas con

informes de daño, únicamente siete colapsaron totalmente (según la Presidencia Municipal), y del orden de 180 presentaban daños medios a severos en la zona de unión entre muros ortogonales.



a) *b)*

Figura 3.16 Agrietamientos verticales en unión perpendicular de muros y colapso total de una vivienda

Según el estudio del impacto socioeconómico realizado por especialistas del CENAPRED, resultaron 5,306 viviendas totalmente destruidas, 15,688 con daños parciales y 9682 con daños leves, de las cuales la mayoría eran vivienda de adobe. El costo total de reparación y reconstrucción de las viviendas afectadas ascendió a 402.8 millones de pesos (Alcocer, 1999).

3.3 RESUMEN DE DAÑOS OBSERVADOS

Juárez y colaboradores hacen un recuento de las características de las viviendas y los tipos de daño por efectos sísmicos que han identificado (Juárez, 2000). Destacan que la configuración que guardan las casas de adobe consiste en general de un cuarto de 8?4 m, por lo que se tienen muros con exceso de largo. Los techos se componen de pendientes a dos aguas, en donde se apoya una trabe central del sistema de techo. El sistema de techo, generalmente se compone de una trabe de madera principal dispuesta en el sentido largo de la estructura, más trabes secundarias en el sentido corto apoyadas en la trabe cumbrera y en los muros largos. En casas con pendientes a dos aguas se pueden tener armaduras incipientes de madera.

Del estudio de los casos, como los aquí incluidos, permite identificar una serie adicional de tipos de falla, que consistentemente se repiten evento tras evento en este tipo de estructuras. El estudio cuidadoso de los tipos de fallas permite proponer opciones de refuerzo o de reparación específicas para cada caso.

En general, el tipo de falla más repetitivo es el agrietamiento vertical en las esquinas de la vivienda, en la unión de muros perpendiculares. En las anteriores secciones se han presentado múltiples ejemplos de esta situación (ver figuras 3.3.a, 3.7, 3.10, 3.14.b y 3.16.a). En la figura 3.17 se presentan más ejemplos de este tipo de falla que resultó el más común. En general nos referimos al agrietamiento vertical cuando se trata de una grieta de separación entre dos muros perpendiculares causada por la tendencia al volteo de los muros y la debilidad en la resistencia a tensión de las piezas. En algunos artículos los autores suponen que esto se debe a un defecto constructivo en donde los muros se construyen independientemente, sin traslape de piezas; pero en la generalidad de los casos sí hay traslape, pero estas piezas se fracturan (ver detalle en la figura 3.17).



Figura 3.17 Agrietamiento vertical en esquinas (Juárez, 2000; Meli, 1998, y otros)

Se puede distinguir el anterior tipo de falla con otro que podemos llamar dislocamiento de las esquinas, donde se tiene un colapso de toda la zona de la esquina (en forma de “L” vista en planta). Esta falla ocurre en la mitad superior del muro. La figura 3.16.a y la 3.18 ilustran el mismo ocurrido a toda la altura del muro.



Figura 3.18 Dislocamiento de la esquina

En la figura 3.19 se muestra el colapso de muros de piedra y lodo, falla debida también al exceso de largo del muro entre soportes, como muros normales o contrafuertes, que pudieran restringir el movimiento fuera del plano. Este puede ser el caso también de la parte central de muros muy alargados que soporten las vigas de madera de techumbres en donde la acción sísmica debida tanto al peso del muro como al del techo provocan la falla en dirección normal al muro.



Figura 3.19 Colapso de muro largo construido con piedra y lodo

El colapso de los techos se puede presentar aislado por la pérdida del apoyo de las vigas de madera, pero por lo general es causado por el la falla o la inclinación excesiva de los muros donde se apoya el sistema de vigas volteándose éstos en dirección normal a su plano. Es común también la caída de tejas, que si bien es una falla menos crítica, puede causar lesiones a los habitantes de la vivienda (fig. 3.20).



Figura 3.20 Daño en el apoyo de las vigas de techo y caída de tejas de arcilla

Cuando los techos son capaces de transmitir las fuerzas laterales a los muros, entonces se pueden generar agrietamientos diagonales típicos de las estructuras de mampostería por la falla por tensión diagonal generada por las fuerzas cortantes horizontales (fig. 3.21). Se ha observado que los agrietamientos se producen en muros con aberturas para puertas y ventanas, específicamente en segmentos de muros limitados por estas aberturas, y que dichos agrietamientos se orientan diagonalmente hacia las esquinas de las mismas.

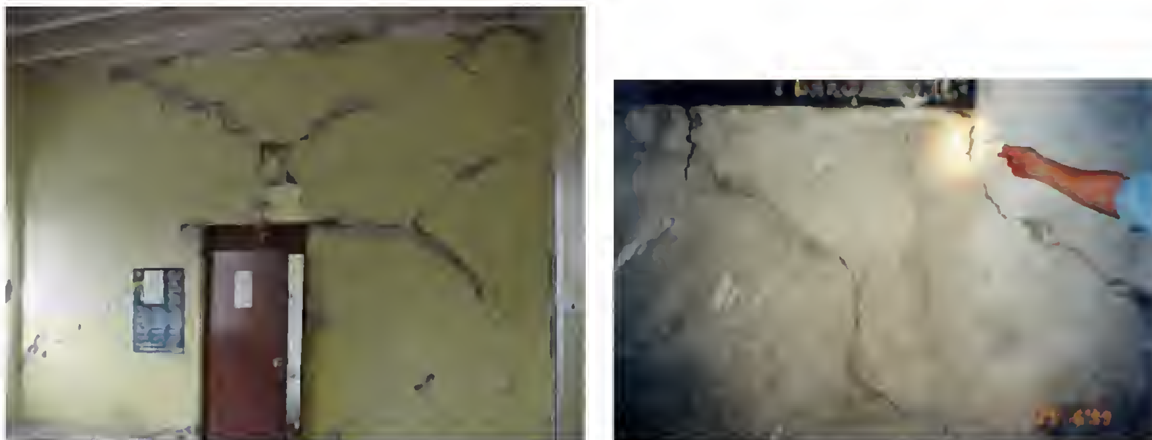


Figura 3.21 Agrietamientos diagonales por tensión diagonal

Otro tipo de daño es el debido al deterioro del adobe, que a la larga produce la pérdida del material del muro reduciendo sus secciones, además de la reducción de la resistencia por dicha degradación (fig. 3.22). La degradación del material se debe principalmente a efectos de humedad, tanto del terreno de apoyo como ambiental, pero también puede intervenir la erosión por el viento o

lluvia, el desgaste por roce constante de animales o actividades humanas, e incluso por degradación orgánica.



Figura 3.22 Degradación del adobe

Por supuesto la falla más catastrófica es el colapso total de la vivienda. Esto se inicia con algunos de los tipos de falla parcial presentados en esta sección, pero que se llevan a niveles tales que provocan el colapso total. Es importante hacer una distinción, para efecto de interpretar cualitativamente la intensidad de la destrucción, ente situaciones donde el colapso se presentó en casos aislados y en aquéllas donde se verificó la destrucción generalizada de un gran número de viviendas en la misma población (fig. 3.23).



Figura 3.23 Colapso total de viviendas en Santa María la Alta, Puebla (Alcocer, 1999)

Cabe incluir el caso de estructuras especiales hechas de adobe. En especial las iglesias, que en general están construidas de mampostería de piedra natural, pero también se cuenta con numerosos templos de adobe, especialmente en regiones rurales para comunidades pequeñas. Estas estructuras son especialmente vulnerables a las acciones de los sismos (Meli, 1998), y así se ha comprobado en el reciente sismo de Tehuacán de 1999 (Alcocer, 1999). La figura 3.24 muestra un templo de adobe ubicado en Guatemala y otro del estado de Puebla que fue dañado en el sismo de Tehuacán.

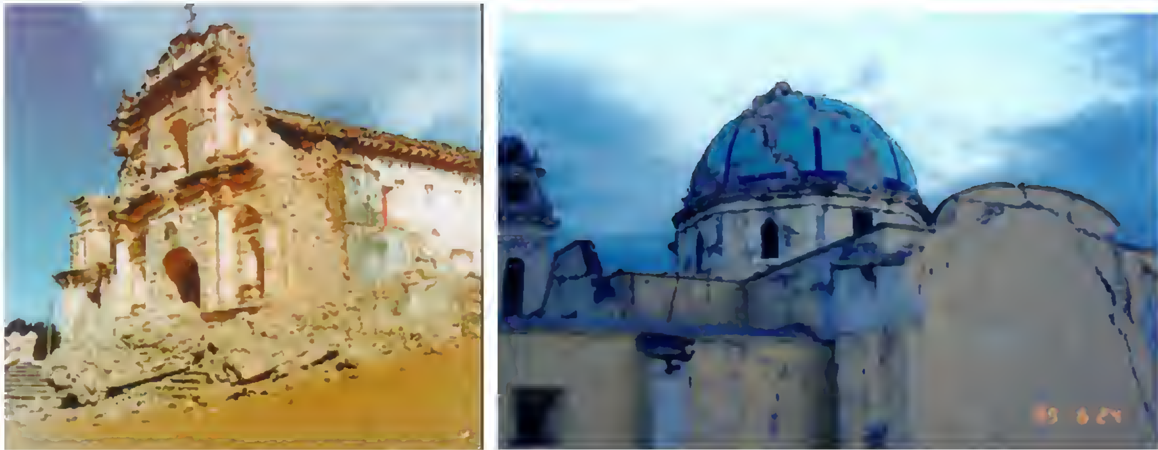


Figura 3.24 Daño en templos de adobe (Meli, 1998 y Alcocer, 1999)

CAPÍTULO 4

ESTUDIOS DE CAMPO, ANALÍTICOS Y EXPERIMENTALES

Como se ha mencionado anteriormente, las estructuras de adobe, en especial la vivienda rural, reviste una gran importancia para muchos países, en particular los de América Latina, debido a la enorme población que habita en ellas y que, en la mayoría de los casos, representa su único patrimonio. Sin embargo los esfuerzos en investigación tienden a encaminarse a los materiales y sistemas más modernos como las estructuras de concreto reforzado o de acero. Incluso se ha venido estudiando en décadas recientes el comportamiento de estructuras hechas con materiales más tradicionales como las estructuras de madera o de mampostería "moderna" a base de piezas más industrializadas y reforzadas con elementos de concreto.

Es importante señalar que, en lo que a investigaciones se refiere, éstas se enfocan más a las características y comportamiento más general de estas estructuras debido a varias razones. Por un lado las propiedades mecánicas, de por sí muy variables en mamposterías modernas, son extraordinariamente inciertas en estructuras de adobe; además es casi nula la posibilidad de que los constructores realicen ensayes de materiales y cálculos estructurales en comunidades rurales de muy escasos recursos y donde las viviendas se hacen por autoconstrucción.

Por otro lado, se trata en general de estructuras sumamente sencillas, pero que presentan debilidades muy claras en la forma de transmitir y resistir las fuerzas debidas a sismos. Así los estudios no requieren ser muy detallados, y más que verificar el comportamiento de partes aisladas de estas estructuras deben enfocarse al comportamiento general, haciendo énfasis en soluciones y recomendaciones simples y económicas que sí tengan la posibilidad de realizarse.

Otro hecho es que muchos de estos estudios llevan décadas de haberse realizado, y por lo tanto se ha tenido desde hace tiempo el conocimiento del tipo de falla y de cómo evitarla. El mayor problema es que no se ha difundido adecuadamente esta información, y nos referimos a todos los niveles, desde las autoridades responsables de la prevención y atención a desastres a nivel nacional y estatal, pasando por las autoridades locales en municipios y por los profesionistas como ingenieros, arquitectos y constructores en general, hasta la población de mayor rezago que es la que finalmente se encuentra en riesgo.

En este capítulo se reúnen algunos de los estudios teóricos que se consideraron clásicos en este tema en México (aunque aún así son poco conocidos), así como aportaciones de estudios recientes y de revisiones del estado del arte sobre este tema en otros países.

4.1 INVESTIGACIÓN DEL ADOBE EN PERÚ

En el Perú se han hecho esfuerzos importantes por estudiar el efecto de los sismos en la vivienda de adobe. Destaca también la labor de difusión de estas experiencias, por lo que se cuenta con información sobre este tema 1.

La necesidad de realizar investigación con base experimental del adobe fue grandemente sentida después del catastrófico terremoto de Ancash del 31 de mayo de 1970, donde se presentó también una avalancha del nevado de Huascarán. Se informó que más del 90 por ciento de las

construcciones dañadas por el sismo eran de adobe y su colapso ocasionó más de 40,000 muertos (Torres, 1991).

Este y otros desastres dejaron la impresión en los especialistas de que se debía prohibir el uso de este material, pero, en una localidad a 40 km del epicentro, el buen estado de las viviendas con ciertas características demostró que era posible que este tipo de estructuras tuvieran un comportamiento satisfactorio bajo ciertas condiciones. La necesidad de determinar tales condiciones para construir viviendas seguras de adobe fue lo que motivó el interés de los investigadores para llevar a cabo estudios racionales y sistemáticos de este material y sistema estructural.

Después del terremoto de 1970, el gobierno peruano creó una comisión de reconstrucción y rehabilitación de la zona afectada. Esta comisión elaboró un manual de construcción de fácil comprensión conteniendo recomendaciones técnicas mínimas para la construcción económica y segura de viviendas de adobe de un piso.

En dicho manual se establece que las fallas en las edificaciones se deben principalmente a la mala calidad del material, dimensiones de los bloques, a la conexión y encuentros inadecuados de los muros, vanos de puertas y ventanas muy anchos y con dinteles poco empotrados, techos pesados en más de un piso y construidas en suelos compresibles y en lugares de alta sismicidad. El manual describe la fabricación de los adobes y la construcción de la vivienda, estableciendo recomendaciones básicas como la de limitar la construcción a un piso, usar concreto ciclópeo en la cimentación, juntas horizontales y verticales de 20 mm, longitudes y alturas limitadas de muros, usar viga collar o dalas en la parte superior de los muros, techos livianos con pendiente moderada e incorporar contrafuertes en los encuentros de muros, entre otros.

Por otro lado, un grupo académico de la Universidad Nacional de Ingeniería comenzaron un programa de investigación experimental iniciando con el estudio de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe simple y reforzado. Uno de los logros fue el uso de suelo–cemento y de varillas de caña impermeabilizadas con asfalto y revestidas con mortero de cemento. Los refuerzos de caña o carrizo se usan para que se comporten en forma similar a las varillas de acero en las construcciones de concreto.

Otros estudios siguieron, entre otros los de la Pontificia Universidad Católica de Perú, la Oficina de Investigación y Normalización del Ministerio de Vivienda y Construcción, el Instituto Nacional de Investigación y Apoyo a la Vivienda, y la Universidad Nacional del Cusco. Entre las aportaciones se incluyes: la inclusión de la caña o carrizo como refuerzo interior, vertical y horizontal; el uso del suelo–cemento como una alternativa de mejorar la adherencia entre el mortero y los adobes; la identificación de los principales modos de falla en las construcciones tradicionales de adobe de un piso (fig.4.1); una primera propuesta de normalización de ensayos en especímenes grandes y pequeños para el estudio de las propiedades mecánicas albañilería estructural de adobe simple y reforzada; una propuesta de métodos racionales para el análisis y diseño estructural de las construcciones de adobe de un piso; y el primer proyecto de normas para la construcción de adobe en el país.

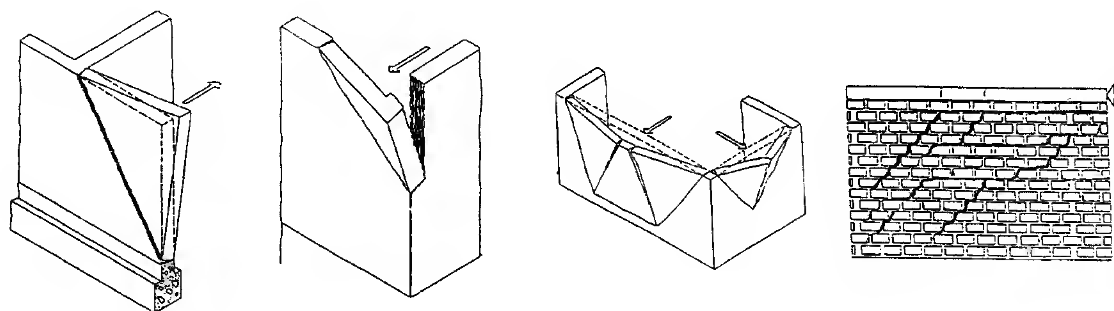


Figura 4.1 Modos de falla típicos de mampostería de adobe (Torres, 1991)

Un aporte importante de la Pontificia Universidad Católica de Perú fue el diseño de un ensaye cuasi–estático de módulos completos de vivienda de adobe que ha permitido simular las fuerzas laterales de sismo inclinando los modelos sobre una plataforma. En 1985 se aprobó la nueva norma E080 para construcción con adobe, recogiendo principalmente los resultados de las investigaciones de esta universidad.

Se debe reconocer también la labor de investigación y difusión del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID que estudia los desastres que ocurren en el Perú. Se fundó en 1986 con el auspicio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Perú y la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, JICA (es el equivalente al CENAPRED de México).

4.2 INVESTIGACIÓN EN EL SALVADOR

El terremoto de San Salvador del 10 de octubre de 1986 dejó alrededor de 25,000 viviendas destruidas, 33,000 viviendas dañadas, 150 edificios dañados, más de 2,000 muertos y más de 300,000 damnificados. En vista de esto, en 1977 la Fundación Salvadoreña de Desarrollo y Vivienda Mínima emprendió un programa de investigación de materiales para vivienda de bajo costo, con el objeto de buscar los medios para mitigar los daños futuros por sismos. El proyecto piloto se desarrolló en la ciudad de San Miguel, al oriente del país, donde son escasos los materiales más modernos para la construcción. La investigación se inició realizando un inventario de los materiales locales próximos al sitio del proyecto, y se concentró en el uso del adobe estabilizado, que tiene mejores características que el adobe común (Hernández, 1991). En las cercanías se encuentra gran cantidad de arcilla, arena de río, así como bancos de tierra blanca.

Se elaboraron varias muestras con el material con el que se elaboraría el adobe estabilizado, con el fin de observar su comportamiento ante diferentes ensayes. Se utilizó: arcilla roja, arcilla gris, arena, tierra blanca, productos asfálticos (aceite quemado), cal apagada y agua. El aceite quemado y la cal fueron los agentes estabilizadores del adobe.

Después de varias pruebas se seleccionó las dimensiones de las unidades de adobe con dimensiones de 230?230?105 mm. Las unidades así elaboradas se ensayaron a compresión a los 14 y 28 días. En la tabla 4.1 se muestran los resultados.

Tabla 4.1 Resultados de ensayes a la compresión

Estabilizador	Proporción	Resistencia en MPa (kg/cm²)		
	asfáltico : arcilla : tierra blanca	a los 7 días	14 días	28 días
Asfáltico	1/8 : 1 : 4	—	1.2 (12.2)	—
Asfáltico	1/8 : 1 : 6	—	0.8 (8)	—
Asfáltico	1/8 : ½ : 2	—	0.5 (5.2)	—
Asfáltico	1/8 : ½ : 3	—	0.34 (3.5)	—
Asfáltico	¼ : 1 : 4	—	0.5 (5.2)	—
Asfáltico	¼ : 1 : 6	—	0.34 (3.5)	—
	cal : arcilla : arena:	7 días	14 días	28 días
Cal	2 : 2 : 2	1.5 (15.1)	2.5 (25.9)	4.6 (47.2)
Cal	1: 3 : 3	2.0 (19.9)	2.0 (19.9)	1.9 (19.2)

Los resultados demostraron que la cal como agente estabilizador mejora notablemente la resistencia a la compresión de las unidades de adobe.

Adicionalmente a la resistencia a la compresión, se realizaron ensayos para probar la resistencia del adobe al intemperismo. Se realizaron dos tipos de pruebas una consistió en la construcción de un muro de 1.5 m de altura con forma de C en planta. Cada lado estaba construido con diferente agente estabilizador: tierra blanca, cal y aceite quemado. El muro fue sometido al chorro de agua de una manguera colocada a 500 mm del muro. La prueba se mantuvo continua durante periodos de tiempo de 15, 30, 60, 90 y 120 minutos. Al final de la prueba se verificó que la pared construida con adobes estabilizados con cal presentaba los mejores resultados con un agujero de tan solo 60 mm de diámetro y con una profundidad máxima de unos 50 mm.

Otra prueba consistió en construir tres muros de 2 m de altura, cada uno con un agente estabilizador. Se dejaron al aire libre durante 6 meses y se constató al final que la pared construida con tierra blanca mostró un cierto deterioro, mientras que los muros donde se usó aceite quemado y cal estaban prácticamente intactos.

Con objeto de evaluar el efecto de la humedad constante en los adobes (por ejemplo para aquéllos en contacto con la tierra) se sometieron a inmersión en agua algunas piezas. La prueba demostró que los adobes comunes se desintegraron a las 19 horas; en cambio los adobes estabilizados soportaron la prueba por un periodo de tres semanas sin presentar deterioro alguno.

Las viviendas que se construyeron constaban de dos habitaciones, separadas por un muro. Las dimensiones de la planta fueron de 5?6 m. Se desplantaron en cimientos de concreto reforzado de 200?400 mm. Después de iniciada la construcción, se decidió mejorar el mortero de pega con una proporción 1:1:5 con lo que se evitaron agrietamientos por contracción.

Los muros se remataron en su parte superior por una dala de concreto reforzado en forma de T, para lo cual las piezas de la última hilada se hicieron en forma de U. Esta dala se coló dejando unos espolones (tramos de castillos verticales) en las esquinas. Esta geometría fue tomada de los ensayes realizados en México en el Instituto de Ingeniería.

También se realizó una evaluación del costo de la vivienda del proyecto considerado. Se consideraron piezas de 230?230?105 mm con dosificación cal:arcilla:arena 1:3:3 en volumen. El costo, a precios de 1990, equivalía a unos 850 dólares norteamericanos. Se puede comparar con el costo de la misma vivienda hecha con bloque de concreto con refuerzo interior que sería de unos 2,250 dólares.

Diez años después de construidas, en 1989, se evaluaron estas viviendas. Sólo el 35 por ciento de ellas se consideró representativo ya que las demás fueron modificadas posteriormente a la construcción por sus habitantes. Se determinó que los muros presentaban cierto deterioro, que se asoció a que la cal no fue correctamente pulverizada durante el proceso constructivo. También se observó que los adobes en forma de U que sirvieron de molde para el colado de la dala superior presentaban deterioro asociado a la adherencia entre el adobe y el concreto. Durante este periodo, solamente ha ocurrido un sismo de importancia que ha afectado la zona donde se encuentra el proyecto, pero se verificó que el comportamiento de estas viviendas ha sido satisfactorio.

4.3 INVESTIGACIÓN EN CHILE

Chile se cuenta entre los países de América con la mayor actividad sísmica y, al igual que otros países de América Latina, posee una gran cantidad de construcciones de adobe. Además, la constante demanda de construcciones, especialmente en zonas alejadas de los centros urbanos industrializados, hace preciso actualizar las recomendaciones existentes para la construcción con este material. Barrios y colaboradores (1986) estudiaron la respuesta del mortero de barro seco variando factores como la arcilla, el limo, la arena y la cantidad de agua de amasado.

Para el estudio se usó suelo de dos regiones, una al norte de Santiago y otra en la localidad de Til-Til, zona eminentemente adobera. Se consideró el empleo de suelos que tradicionalmente hubieran sido utilizados en la fabricación de bloques de adobe. El segundo factor sconsiderado fue la cantidad de arena, estudiándose mezclas con 0, 20, 40, 60 y 80 por ciento de arena en peso, referido al peso del suelo seco. También se estudió el efecto de la adición de estiércol vacuno, en proporciones de 0, 2 y 5 por ciento en peso de suelo seco. La cantidad de agua que se consideró se varió en referencia al límite líquido y límite plástico, que son propiedades muy usuales en el estudio de la mecánica de suelos.

Se realizaron pruebas de compresión, de flexión (módulo de ruptura), contracción lineal y velocidad de ascenso de la humedad capilar. Las cualidades deseables que se determinaron para la arena destaca que debe ser bien graduada y limpia según un análisis de granulometrías. Es deseable que los granos de la arena sean angulosos, laminares y de máxima rugosidad para favorecer la trabazón y adherencia entre éste y el material cementante. En la figura 4.2 se muestra una tabla resumen de los resultados en cuanto a resistencia a la compresión, flexión, contracción y velocidad de ascensión de humedad capilar, todos ellos en función del porcentaje de arena.

Se observa que a mayor porcentaje de arena, menor es la resistencia a la flexión, así como la resistencia a la compresión. Se explica esto principalmente por el efecto de la cohesión que se proporciona el material arcilloso, en especial para la flexión. Se ha marcado una zona entre el 55 y 65 por ciento de contenido de arena (en peso del suelo seco), y se observa que para porcentajes mayores, la resistencia a flexión decae con mayor celeridad. La tendencia a disminuir la resistencia a la compresión es más suave. Por su parte la contracción lineal se reduce también conforme se aumenta el contenido de arena. En cuanto a la velocidad de ascenso de la humedad capilar es creciente con el contenido de arena en ambos tipos de suelos estudiados. Se explica esto por el efecto de impermeabilidad que le confiere el material arcilloso, que se va reduciendo en proporción al aumento de la arena. Dado lo sensible que es el adobe a la humedad, sería deseable que se encontrara en un punto o zona donde la velocidad de ascenso de la humedad capilar fuera lo más baja posible.

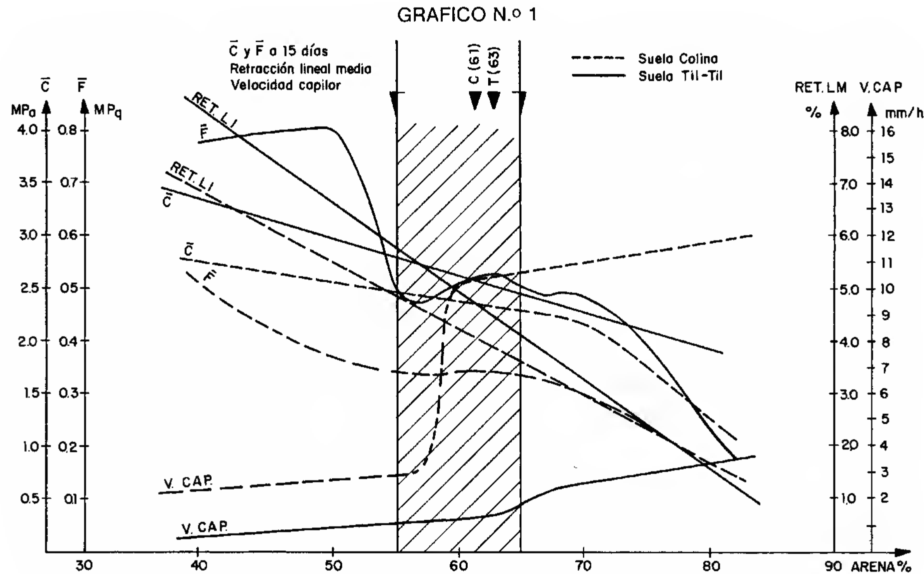


Figura 4.2 Efecto de la variación del porcentaje de arena en el comportamiento (Barrios, 1986)

En forma similar se estudiaron los factores considerados manteniendo fijos unos mientras se variaban otros. Por ejemplo, se concluyó que al agregar estiércol no se reducen las contracciones, sin embargo, resulta conveniente ya que pequeñas dosis de este ingrediente mejoran la trabajabilidad de la pasta, sin alterar en modo significativo las características mecánicas del adobe. En este aspecto queda por determinar el efecto a largo plazo, derivado de la inclusión de estiércol, a causa de la descomposición orgánica. Los resultados de este estudio pueden resumirse en las siguientes cuatro recomendaciones básicas:

1) Emplear suelos con relación limo–arcilla cercana a uno. La sumatoria de los mismos se debe encontrar entre el 35 y el 45 por ciento del total.
2) El contenido de arena del suelo debe encontrarse entre un 55 y un 65 por ciento, medido en peso del suelo seco.
3) La cantidad óptima para el agua de amasado depende de las porpiedades propias del suelo y de la tecnología empleada. En este estudio el óptimo resultó ser el límite líquido más un tercio del índice plástico.
4) Para que el barro una vez seco alcance características mecánicas satisfactorias y uniformes es preciso que: se proceda al macerado del suelo en estado saturado de 48 a 72 horas; y que antes del llenado de los moldes, proceder a un intenso amasado de la pasta para evitar que las láminas de arcilla se ordenen según atracciones eléctricas.

4.4 INVESTIGACIÓN EN MÉXICO: ESTUDIOS ANALÍTICOS

De entre los estudios más importantes en México, que ahora se consideran clásicos en el estudio del comportamiento de viviendas de adobe, se tienen los realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM en la segunda mitad de la década de los 70.

Bazán y colaboradores realizaron, mediante el método de elementos finitos, el análisis dinámico espectral de varias casas con dimensiones y estructuración comunes en la provincia mexicana. De los resultados se propone un método simplificado para el análisis de estas estructuras, así como otro método más simplificado aún, que toma en cuenta relaciones geométricas (Bazán, 1978).

4.4.1 Análisis Dinámico con el Método del Elemento Finito

Para realizar este análisis se tomaron las propiedades mecánicas de los materiales estudiados en otras investigaciones del Instituto de Ingeniería (ver Hernández, 1979). El análisis se realizó mediante el programa de cómputo SAP IV, ejecutado en una computadora de alta capacidad para la época en el entonces Centro de Servicios de Cómputo de la UNAM. De estos estudios se tomaron las siguientes propiedades de los materiales:

?? Peso volumétrico del adobe: ? = 1800 kg/m^3;
?? Módulo de elasticidad: E = 2,500 kg/cm^2;
?? Resistencia a la compresión: f_m = 13.4 kg/cm^2
?? Resistencia al cortante: v_m = 1.2 kg/cm^2;
?? Esfuerzo cortante admisible: v_r = 0.25 kg/cm^2;
?? Resistencia a la tensión por flexión (módulo de ruptura): f_t = 2.6 kg/cm^2;
?? Esfuerzo admisible a tensión por flexión: $f_{t,adm}$ = 0.5 kg/cm^2;
?? Se consideró el coeficiente de Poisson como: ? = 0.3.

Los valores se determinaron mediante ensayes de especímenes secos no intemperizados (considerar que la humedad reduce notablemente la resistencia y rigidez). Los esfuerzos admisibles fueron propuestos considerando factores de seguridad cercanos a 5. Para el análisis elástico es aceptable suponer que se trata de un material homogéneo e isótropo; de hecho cumple mejor estas condiciones que la mampostería de piezas de arcilla o concreto unidas con mortero de cemento, ya que en el caso del adobe las piezas y el mortero son hechos del mismo material. Para las características típicas de las viviendas se consideró lo siguiente:

?? Cuerpos de un solo piso y planta rectangular alargada, con áreas de 30 a 50 m^2;
?? Muros de 3 a 3.5 m de altura;
?? Espesor de muros de 40 a 60 cm;
?? En ocasiones cuenta con un muro divisorio;
?? Techos generalmente a dos aguas con pesos de 50 kg/m^2 (caso ligero como tejas de barro sobre listones de madera y vigas), hasta 500 kg/m^2 (caso pesado con relleno de tierra de 30 a 50 cm de espesor sobre tarima de madera y un enladrillado superior);
?? Los anteriores sistemas de techo son flexibles en su plano y no forman diafragma rígido.

El estudio constó de 15 casos con dos análisis para cada caso (30 análisis en total); en 2 de los 15 casos se propuso una geometría distinta a la rectangular (circular y elíptica).

Para cada uno de los 15 casos (I a XV) se hizo un análisis suponiendo que no tenía dala de concreto superior y otro considerando que sí existía. Esta dala se propuso de 20 cm de altura y con el espesor del muro. El caso I fue el modelo básico de comparación, y en los otros casos se fue cambiando una sola variable dejando las demás iguales al modelo patrón.

El modelo básico contó de una planta rectangular sin muro interior, con dimensiones en planta de 7.35?4.6 m a ejes ($L?B$), altura de muros de 2.8 m y espesor de paredes de 40 cm. No se consideraron aberturas de puertas ni ventanas y se le supuso un techo ligero de 50 kg/m². Las variables de los otros modelos se indican en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Variables de estudio para el análisis dinámico de elemento finito

Caso	Cambios en sólo una de las variables
I	modelo básico de comparación
II	espesor: t = 20 cm
III	espesor: t = 60 cm
IV	longitud del muro "largo": L = 4 m
V	longitud del muro largo: L = 5 m
VI	longitud del muro largo: L = 10 m
VII	altura de muros: H = 2.4 m
VIII	altura de muros: H = 3.5 m
IX	muro divisorio
X	techo pesado: 500 kg/m²
XI	diafragma rígido
XII	planta elíptica
XIII	planta circular
XIV	grieta vertical en esquina hasta H/4
XV	grieta vertical en esquina hasta H/2

El análisis que se realizó consistió en un análisis dinámico modal espectral. En la figura 4.3 se muestra el espectro de diseño utilizado, mismo que era el recomendado para terreno duro en la zona D de la regionalización sísmica de México (ver fig. 3.1 para la regionalización actual). Por la simetría de la estructura se analizó sólo la cuarta parte de la misma estableciendo las condiciones de frontera adecuadas. La dirección de análisis fue paralela a los muros "cortos" o cabeceros de longitud B = 4.6 m. El muro divisorio interior re consideró paralelo a los muros cabeceros.

Se decidió realizar el análisis mediante el método del elemento finito debido a que no es válido en este tipo de estructuras aplicar los métodos de análisis comunes, ni con el método simplificado para estructuras a base de muros de mampostería con sistemas de piso rígidos, ni aún con métodos estáticos o dinámicos donde se modele a la estructura con marcos de columna ancha equivalente con las propiedades de los muros. En este tipo de estructuras no convencionales (complejas desde el punto de vista del análisis dinámico) se debe considerar que tanto la masa como la rigidez está distribuida uniformemente y en forma tridimensional, y no procede suponer que la masa se concentra en los techos, como se acostumbra en los edificios.

Con la herramienta de cómputo empleada, se usaron elementos tipo cascarón rectangular, que incluyeron efectos de flexión y de membrana. Se consideró suficiente incluir la superposición modal de los dos primeros modos de vibrar, mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las respuestas. En la figura 4.3 se aprecia la deformada de los dos primeros modos, así como la malla de elementos finitos usada.

Se puede apreciar que en el comportamiento dinámico, el muro largo tiende a oscilar fuera de su plano, con los mayores desplazamientos al centro del mismo con la consiguiente tendencia al volteo. Este movimiento es restringido por los muros cabeceros mientras no se alcance la resistencia del material en las esquinas. Si se analizan los momentos flexionantes en el muro largo, alrededor de un eje vertical, se encuentran los diagramas de momentos mostrados en la figura 4.4. Se determinó que los mayores momentos flexionantes se generan en los extremos del muro en la parte superior.

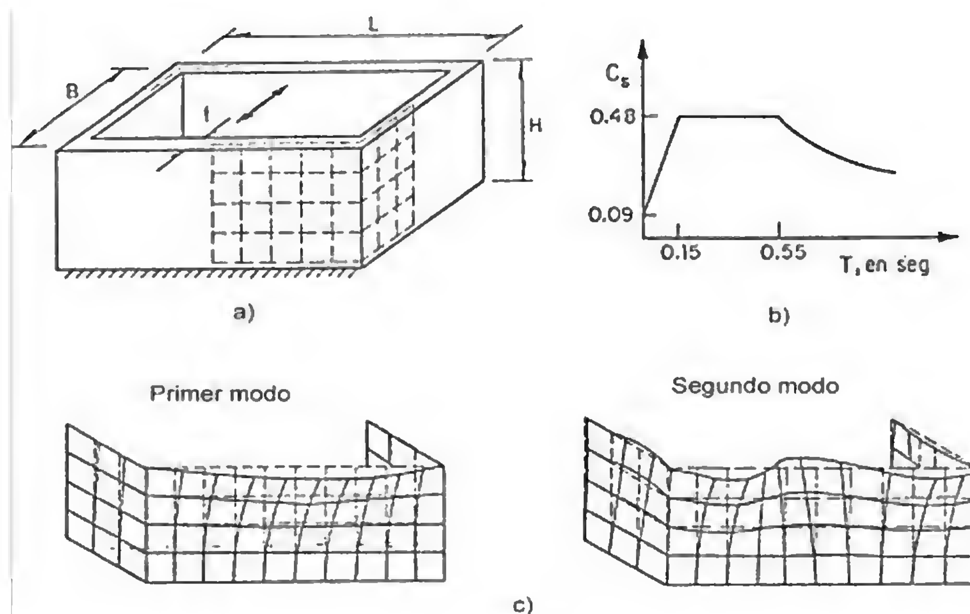


Figura 4.3 a) Geometría de los modelos e idealización; b) espectro de diseño usado; c) modos de vibrar

El efecto de la viga o dala–cadena sobre la configuración deformada es de disminuir los desplazamientos debidos a flexión y prácticamente anular el giro en la parte superior de las esquinas. Este elemento restringe los desplazamientos fuera del plano de la parte central superior del muro largo, pero esto depende de la rigidez de dicha dala, en función de su sección, material y de la longitud del muro. En todo caso representa un apoyo elástico que restringe los desplazamientos señalados.

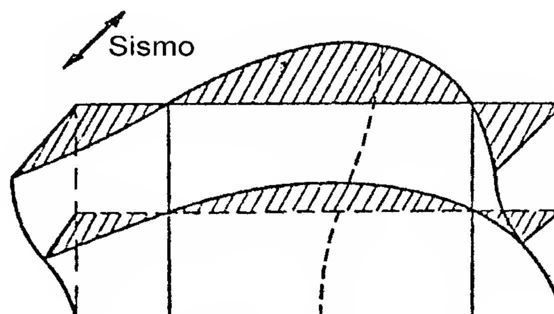


Figura 4.4 Momentos flexionantes

En cuanto a los esfuerzos cortantes paralelos a los muros cabeceros, y del análisis de los resultados obtenidos se identifica que, mientras mayor sea la rigidez del sistema de techo o de las dalas–cadena, mayor será la fuerza cortante que se transmitirá a dichos muros cabeceros. De lo contrario, es decir si no hay un sistema rígido en la parte superior de los muros, la parte central de los muros largos se apoya menos en los muros cabeceros y transmite ella misma sus fuerzas al terreno en su base. De esta forma, el caso más conservador para revisar en conjunto los muros paralelos al sismo ante fuerza cortante, es suponer un diafragma rígido (así el 100 % de la fuerza sísmica la tomarán estos muros).

En el caso de haber muro intermedio (paralelo a la fuerza sísmica), este tomará la carga de la parte central del muro largo. El porcentaje de la carga total que toma este muro resultó entre el 59 y 62 por ciento de la total (muy similar a lo que tomaría un apoyo intermedio en una viga continua con carga uniformemente distribuida.

De los resultados obtenidos, se puede considerar, conservadoramente, el uso de la ordenada espectral para periodos de T = 0.25 s. Los elementos mecánicos en la dala–cadena resultaron muy inferiores a la resistencia de ésta, por lo que se puede considerar un diseño simplificado con cuatro barras de 12.7 mm de diámetro (del número 4) y estribos de 6.3 mm (número 2, “alambrón”) a cada medio peralte. Finalmente se debe mencionar que el espectro de diseño se tomó elástico, sin reducción por ductilidad, pero para fines de revisión se recomienda usar un factor de comportamiento sísmico de $Q = 1.0$ si no tiene dala–cadena y $Q = 1.5$ en caso de tenerla; sin embargo.

4.4.2 Método Simplificado para Análisis Sísmico de Estructuras de Adobe

Con base en los resultados de los análisis estudiados en la sección anterior, Bazán y colaboradores propusieron una serie de verificaciones simplificadas para cada tipo de falla que se puede presentar (Bazan 1978). Aceptando como exacto el análisis dinámico de elemento finito, en rango elástico, y con las hipótesis y simplificaciones, que se desarrolló en la primera parte del estudio, los resultados serán válidos en la medida de que las propiedades de materiales y geometrías de viviendas correspondan a los rangos de valores empleados. Así las expresiones que se desarrollaron están calibradas con los resultados de estos análisis.

En general se propusieron ecuaciones racionales para determinar los efectos sísmicos para cada tipo de falla identificados, para lo cual se ajustaron ciertos parámetros con los resultados de los análisis. Algunos valores de establecieron en tablas que se presentan en el trabajo consultado (Bazán, 1978), pero lamentablemente están dispuestos en función de coeficientes sísmicos y espectros de diseño de la época del estudio, por lo que deberían ser actualizados. Sin embargo, las expresiones básicas siguen siendo válidas y se presentan a continuación.

Para obtener la fuerza cortante de la estructura completa se aplica la expresión usual:

$$V = c\, W' \qquad (4.1)$$

donde c es el coeficiente sísmico y W' el peso de la estructura para fines sísmicos, pero que no es el peso total (un caso muy conservador sería tomarlo así). La fuerza cortante V que deberán resistir los muros paralelos a la acción sísmica se calcula con el peso debido a la masa de techo y de muros, pero no en toda la altura de los muros, pues la parte inferior de éstos transmite la fuerza directa al terreno; ni tampoco se considera la masa en toda la longitud de los muros longitudinales (normales a la fuerza sísmica) ya que, dependiendo de su longitud y de la rigidez del sistema de techo o la presencia de dalas–cadena, éstos se apoyarán sólo parcialmente contra los muros cabeceros u otros muros normales a ellos. Para el cálculo del peso W' se consideran las distancias L' y H' que se muestran en la figura 4.5 y que se definen a continuación.

$$\begin{aligned} &L' = 2H^2/L \; ? \; L; \quad && H' = H/4; \quad && \text{en casos sin viga–cadena} \\ &L' = 3H^2/L \; ? \; L; \quad && H' = H/3; \quad && \text{en casos con viga–cadena} \qquad (4.2) \\ &L' = L; \quad && H' = 3H/5; \quad && \text{en casos con techo rígido} \end{aligned}$$

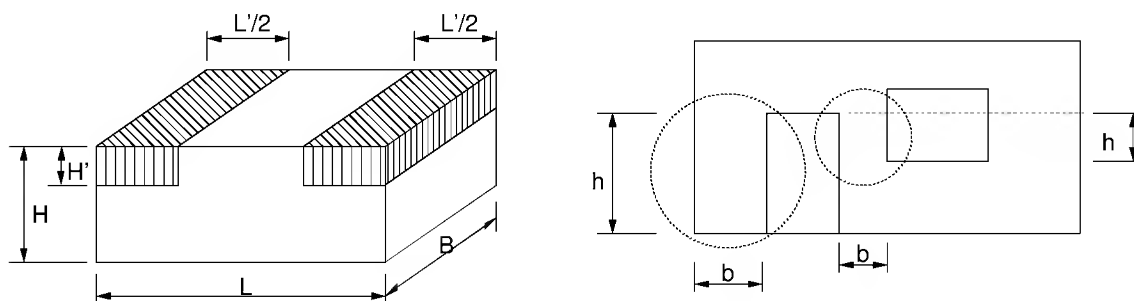


Figura 4.5 ***Masa equivalente para calcular el cortante con el método simplificado y segmentos de muro para la reducción por muros cortos***

El caso más conservador es que cada muro paralelo al sismo reciba una parte de la fuerza V debida a las masa que se encuentren en una zona tributaria. Así, si sólo hay dos muros cabeceros, a cada uno le corresponde el 50 por ciento de V. Si hay muro o muros intermedios, la zona que le toca a cada muro será: si es muro extremo, el 40 por ciento de la distancia al muro intermedio continuo, al cual le corresponde el 60 por ciento restante. Entre dos muros intermedios la repartición será del 50 por ciento de la distancia entre ellos a cada uno. Lo anterior es similar a la repartición simplificada que se hace de la longitud tributaria de la carga de una viga continua sobre apoyos extremos e intermedios.

En casos de muros distribuidos en forma irregular, se puede seguir un criterio congruente con lo anterior. Esta distribución considera que no existe un diafragma rígido que distribuye los cortantes en forma proporcional a las rigideces relativas. Se puede poner cuidado especial en identificar a donde se descarga el peso del sistema de techo, o suponer simplificadamente que la carga uniforme del techo se reparte conforme a las zonas tributarias explicadas. Para la revisión de los muros largos se sigue el mismo procedimiento pero cambiando la dirección de análisis.

En caso de contar con aberturas en el muro, el área resistente se puede reducir como se recomienda en las normas de mampostería del Reglamento del Distrito Federal (DDF, 1995), mediante un factor de reducción por muros cortos, igual a $(1.33\ b/h)^2$? 1, (fig. 4.5). La revisión de cada muro se realiza comparando la fuerza actuante con la resistente como sigue:

$$V_R = v_r\, A_T \tag{4.3}$$

donde v_r es el esfuerzo cortante admisible y A_T es el área de la sección transversal del muro, sin contar aberturas y considerando la reducción por muros cortos.

El momento flexionante máximo se genera en la conexión entre los muros. Se propone que el cálculo de éste, por unidad de longitud, se calcule con la expresión siguiente.

$$M = c\, w\, x^2 / k \tag{4.4}$$

donde

- c ordenada espectral;
- k coeficiente calibrado con los resultados de los análisis y vale 5 si existe dala–cadena y 20 en caso contrario;
- x distancia que vale H o $L/2$, el menor de ellos; y
- w peso por unidad de longitud que se determina considerando el peso de una franja de altura unitaria del muro frontal más la mitad del peso del techo y, en su caso, de la viga.

Con esta expresión se obtiene valores entre 90 a 135 por ciento de los resultados obtenidos con elemento finito, que para este tipo de estructuras es razonablemente aceptable.

La revisión es mediante la comparación del esfuerzo en las fibras a tensión de una sección de ancho unitario, contra el esfuerzo a tensión admisible. Como el análisis es elástico se puede usar la fórmula de la escuadría calculando el esfuerzo mediante el módulo de sección, $S=t^2/6$:

$$M_{Resistente} = f_{t,\ adm}\ S\ ?\ M_{actuante} \tag{4.5}$$

Otras revisiones que se deben hacer son para el momento de volteo del conjunto. Para esto se considera la flexión en el plano del muro y se puede tomar el efecto de patín de los muros transversales con un ancho de una vez el espesor del muro. La revisión se hace por esfuerzos permisibles y la fórmula de la escuadría verificando que el esfuerzo a tensión no sobrepase el admisible. Se debe tomar la contribución de la carga vertical que actúan disminuyendo los esfuerzos de tensión.

Para segmentos de muro limitados por aberturas de puertas y ventanas (fig. 4.5), se puede realizar la revisión de la flexión en el plano del muro suponiendo que sus extremos están empotrados, y como le corresponde una fuerza cortante V_i, entonces $M_i = V_i\ h\ /2$. Se revisa entonces el esfuerzo máximo a tensión incluyendo la acción de la carga axial.

Finalmente en este estudio, Bazán y colaboradores manejan los valores de acciones y resistencias con las propiedades típicas propuestas, suponiendo y aceptando ciertas hipótesis razonables, y establecen en tablas los resultados numéricos que pueden ser fácilmente comparados con relaciones geométricas de la estructura de adobe. Ejemplos de estas relaciones son la sumatoria de longitudes de muros en una dirección entre la sumatoria de las correspondientes en la otra dirección L_1/L_2; un parámetro Z que depende de la zona sísmica, altura de la construcción y peso del techo; relación b/h de un segmento de muro; etc.

Como comentario adicional se debe aceptar que es fabulosa la utilidad esta investigación, que proporcionó herramientas suficientemente simples y confiables para la revisión estructural de este tipo de edificaciones, aunque dicho trabajo representó un gran esfuerzo computacional en su época. Pero vale la pena reflexionar que en la actualidad, y cada vez más a futuro, la potencia del equipo de cómputo ha aumentado formidablemente, tanto así que no es difícil pensar que ya se puede aplicar un análisis riguroso a estructuras específicas con un simple equipo personal; incluso se puede considerar extenderlo a elemento finito inelástico con análisis dinámico paso a paso. Claro está que esto se apreciaría en investigación o en el caso de estructuras muy especiales.

4.5 ENSAYES EN MESA VIBRADORA DE UNA ESTRUCTURA DE ADOBE A ESCALA

De los estudios realizados en el Instituto de Ingeniería, el más trascendental fue el del ensaye de modelos de vivienda de adobe ante efectos dinámicos realizados en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Hernández, 1979).

Los antecedentes del estudio incluyeron la recopilación de información sobre tipología de la vivienda y sobre daños sufridos a raíz de sismos; la realización de ensayes para determinar las propiedades de los materiales más comúnmente empleados así como de los elementos constructivos como muros; la evaluación de algunos procedimientos de refuerzo y el ensaye dinámico de modelos a escala con y sin refuerzo.

Los resultados de la evaluación de las características típicas de las viviendas así como de propiedades típicas de este material se describieron ya en la sección anterior. Para el diseño de los modelos se tomó una geometría congruente con la usada para los análisis con elemento finito.

4.5.1 Propiedades Mecánicas del Adobe

La primera parte del estudio experimental se realizó para determinar las propiedades de la mampostería de adobe que más influyen en el comportamiento sísmico, para los adobes construidos con distintos tipos de suelo y característicos de diferentes regiones. En la tabla 4.3 se presentan los resultados promedio para muestras de adobe que se recolectaron de diferentes regiones de la república seleccionadas de entre las de mayor riesgo sísmico. De estas muestras se sacaron especímenes de diferentes medidas para la realización de ensayes de compresión y de tensión por flexión.

El valor promedio de la resistencia a compresión fue de 0.97 MPa (10 kg/cm²) con un coeficiente de variación del 34 por ciento; y para la resistencia de tensión por flexión o módulo de ruptura se obtuvo un valor promedio de 0.3 MPa (3.1 kg/cm²) y coeficiente de variación del 36 por ciento. Según la revisión que se realizó, los valores reportados en la literatura caen dentro del intervalo encontrado en las pruebas.

Para el estudio de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe, es decir, conjuntos de mortero y adobes colocados con el aparejo típico (con cuatrapeo de piezas), se fabricaron en el laboratorio adobes de tal forma que tuvieran las mismas propiedades de las muestras de la tabla 4.3. Se fabricaron adobes en dos tamaños: 100?160?600 mm y de 40?160?240 mm. Los segundos corresponden a los tabiques escalados en un factor de 2.5, mismo que se usaría en la construcción de los modelos para el ensaye dinámico y así tener las características exactamente de las mismas piezas a usar y poder comparar con las de las piezas tamaño natural.

Tabla 4.3 Resistencia a compresión y módulo de ruptura

Procedencia	Compresión, MPa (kg/cm²)	Módulo de ruptura, MPa (kg/cm²)
Chiapas	1.6 (16)	0.19 (2)
Chiapas	0.97 (9.9)	—
Chiapas	0.77 (7.9)	0.39 (4)
Guatemala	0.9 (9.1)	—
Guerrero	0.8 (8.1)	0.29 (3)
Guerrero	0.51 (5.2)	0.43 (4.4)
Oaxaca	0.91 (9.3)	—
Oaxaca	1.3 (13.5)	0.19 (2)
Media	0.97 (9.9)	0.3 (3.1)
Coefic. variación	0.34	0.36

Se probaron tipos de suelos hasta lograr consistentemente resistencias de 1.47 y 0.31 MPa para compresión y módulo de ruptura, respectivamente (15 y 3.2 kg/cm²). Se aceptó este material ya que la resistencia a la tensión por flexión o módulo de ruptura se consideró más importante de reproducir con precisión que la correspondiente a la compresión. Adicionalmente se dosificó paja a la mezcla para obtener características de contracción similares.

De la observación de la contracción de los adobes de cada tamaño durante seis semanas bajo techo, se determinó que el 80 por ciento de la misma ocurrió en la primera semana y que en total se llegó a un 4 por ciento de contracción.

Se construyeron muretes y pilas para ensayes a compresión, cortante y flexión, variando el tipo de mortero entre el uso de lodo, de mortero de cal y de mortero de cemento. En la figura 4.6 se esquematiza los ensayes realizados y en la tabla 4.4 se presentan los resultados.

Tabla 4.4 Resultados de los ensayes en muretes y pilas (promedios de tres o más probetas)

Tipo de ensaye	Mortero cem:cal:arena	Dimensiones de piezas, mm	Resistencia MPa (kg/cm²)	Módulo de elasticidad de pilas MPa (kg/cm²)
Pila	lodo	100?160?600	1.32 (13.5)	245 (2 500)
Pila	lodo	40?160?240	1.31 (13.4)	245 (2 500)
Pila	1:2:9	40?160?240	1.37 (14)	490 (5 000)
Pila	0:1:3	40?160?240	se despegaron durante su manejo	
Compresión diagonal	lodo	100?160?600	0.14 (1.4)	—
Compresión diagonal	lodo	40?160?240	0.12 (1.2)	—
Compresión diagonal	1:2:9	40?160?240	0.26 (2.6)	—
Compresión diagonal	0:1:3	40?160?240	0.07 (0.7)	—
Cortante directo	lodo	40?160?240	0.07 (0.7)	—
Flexión en murete	lodo	40?160?240	0.26 (2.6)	—

Los resultados demostraron que el tipo de mortero tiene poca influencia en la resistencia a compresión de las pilas, la cual fue ligeramente inferior a la de las piezas. La relación esfuerzo–deformación resultó aproximadamente lineal (fig. 4.6). Por su parte la resistencia a tensión por flexión resultó sólo ligeramente inferior a la determinada en los adobes solos. Se concluye que las propiedades de un muro de adobe junteado con lodo son prácticamente las mismas que las de las piezas solas, por lo que se tiene un elemento prácticamente monolítico.

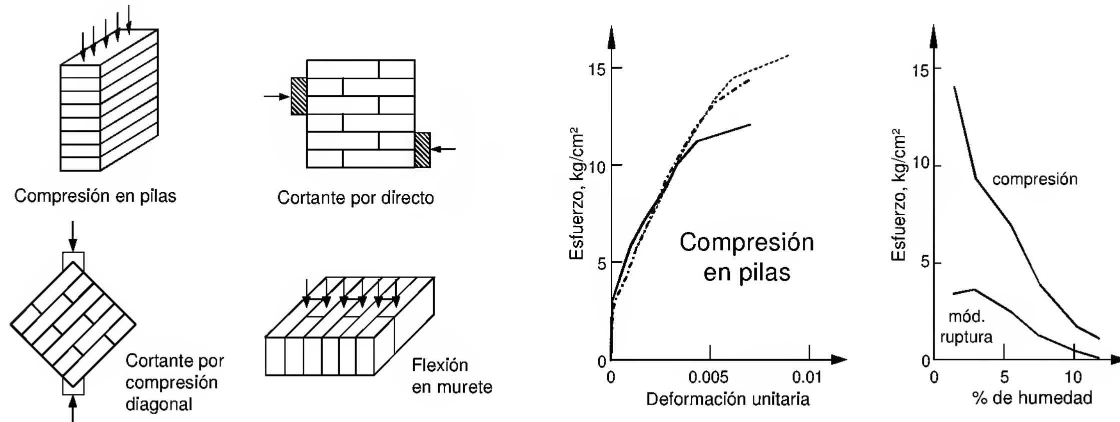


Figura 4.6 Ensayes de materiales

Se hicieron también pruebas de compresión y ruptura de adobes humedecidos con varios contenidos de humedad. En la figura 4.6 se presentan estos resultados donde se aprecia que las resistencias disminuyen con la humedad hasta prácticamente cero para humedades del 12 por ciento.

Adicionalmente se construyeron dos muros de 2?2 m uniendo las piezas con mortero de lodo y se ensayaron ante ciclos de carga lateral alternada creciente hasta el colapso. Para eliminar la posibilidad de la falla por flexión se colocó refuerzo vertical en los extremos. En la figura 4.7 se presenta la geometría de los especímenes así como la curva de histéresis de uno.

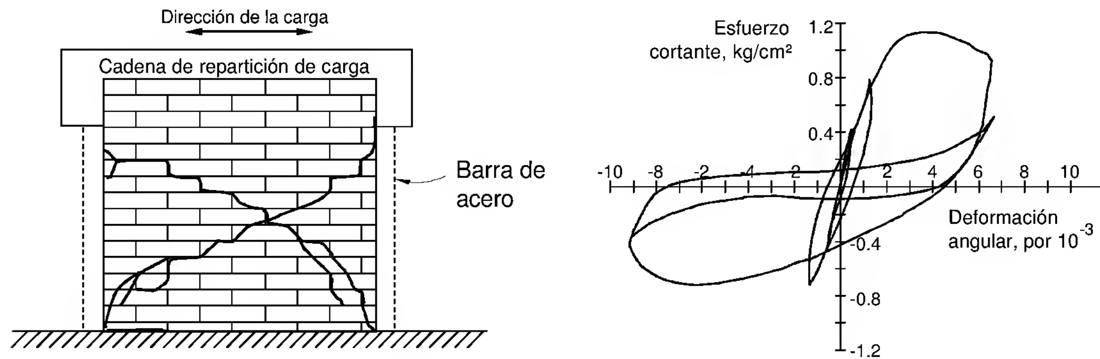


Figura 4.7 Ensaye de muros ante carga lateral alternada

El comportamiento de los modelos fue lineal hasta cerca del agrietamiento que se presentó, con el esfuerzo máximo de la prueba, a 0.11 MPa (1.1 kg/cm²). El módulo de cortante promedio fue de 73.6 MPa (750 kg/cm²) y ante repeticiones de cargas alternadas se lograron ciclos estables antes del agrietamiento diagonal; después de éste, la capacidad del muro para soportar cargas laterales alternadas se redujo casi a cero. Cabe destacar que la resistencia a cortante obtenida en muros, de 0.11 MPa fue muy parecida a la obtenida en muretes hechos con las mismas piezas (0.12 MPa).

Al aplicar el criterio probabilista para obtener las acciones de diseño indicado en la sección 2.4.1 del capítulo 2 (ecs. 2.2 y 2.3) se obtuvo:

Resistencia en compresión	$f_m^* = 0.59$ MPa (6 kg/cm²);
Resistencia en tensión por flexión (mód. ruptura)	$f_t^* = 0.2$ MPa (2 kg/cm²);
Resistencia en cortante	$v_m^* = 0.08$ MPa (0.8 kg/cm²);

Los anteriores son esfuerzos a la falla, pero con cierta probabilidad de ser alcanzados por todas las piezas. Para obtener esfuerzos admisibles se debe usar un factor de seguridad. Hernández y colaboradores señalan que éste se puede tomar como 2.5. En caso de condiciones de humedad, estos valores deberán ser más conservadores. Una propuesta es reducir las resistencias por lo menos a la mitad.

4.5.2 Pruebas Dinámicas en Mesa Vibradora

Uno de los principales problemas del ensaye de este tipo de estructuras, si se realiza en laboratorios convencionales, es la aplicación de las cargas horizontales sin que se produzcan fallas locales por la concentración en puntos específicos. Además, como la mayor masa se encuentra repartida en el volumen del muro, las fuerzas inerciales inducidas por las aceleraciones del terreno realmente distribuyen en todas las partículas del cuerpo, por lo que no es representativo concentrarlas en puntos específicos en estructuras de este tipo, a diferencia de estructuras tipo edificio con diafragmas rígidos en donde se puede simular la acción con fuerzas concentradas al nivel de las losas de entrepiso. Una alternativa sencilla y representativa es el ensaye colocando al espécimen sobre una plataforma que se puede inclinar, con lo cual una componente de las fuerzas gravitatorias producen el efecto de las fuerzas horizontales inducidas por sismos. Sin embargo, el ensaye más representativo es el de someter al espécimen a la excitación real en su base mediante el uso de una mesa vibradora. De esta forma, se realizó la parte complementaria del estudio con la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Los modelos se construyeron a escala geométrica reducida de 1 a 2.5, debido a las limitaciones en el tamaño y capacidad de la mesa vibradora. Esto llevó una serie de revisiones en la forma de modelar la estructura de tal forma que se cumplieran las leyes de similitud dinámica cuando se realiza un ensaye de una estructura a escala. Se plantearon tres alternativas, una era aumentar la densidad del material en 2.5 veces; otra opción era reducir la rigidez y la resistencia de los materiales en dicha proporción. Debido a las dificultades para lograr las anteriores condiciones se tomó una tercera alternativa que era probar los modelos tal como eran; con esto se cumplen las condiciones para reproducir exactamente el comportamiento y los esfuerzos dinámicos, pero los esfuerzos estáticos resultan menores que los requeridos. A pesar de esto así se optó por esta opción, y en algunos casos se colocó una masa adicional sobre los muros para aproximar el efecto de mayor masa (primera de las opciones explicadas). Adicionalmente se deben alterar la escala de tiempos y aceleraciones del movimiento sísmico.

Para los registros se seleccionaron el registro de El Centro, componente N-S, ocurrido el 18 de mayo de 1940 en California; el sismo de Managua del 23 de diciembre de 1972, componente E-W, que causó destrucción importante en vivienda de adobe; y el sismo registrado en Oaxaca el 28 de agosto de 1973, componente N-S, ocurrido cerca de Orizaba Ver, y que causó destrucción, entre otros lugares, en Ciudad Serdán, Pue. Las aceleraciones máximas de estos registros corresponden a 0.35, 0.37 y 0.2 veces la aceleración de la gravedad, respectivamente.

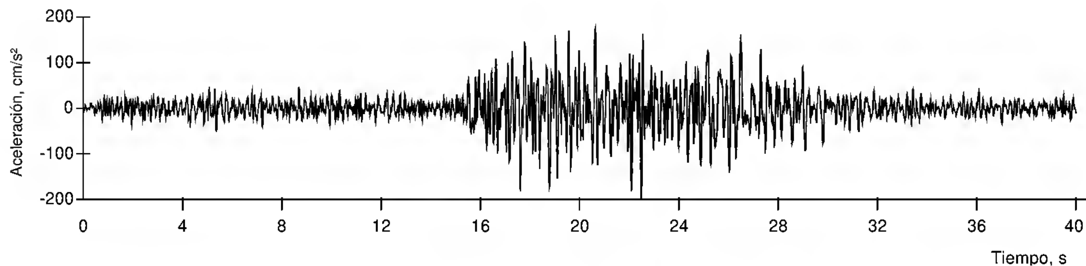


Figura 4.8 Registro de aceleraciones del sismo de 1973, Oaxaca

La modelación no fue fácil ya que fue necesario ajustar las historias de desplazamientos de los sismos debido a la capacidad de desplazamiento de la mesa vibradora por lo que se tuvo que procesar los sismos corrigiendo la línea base; así la aceleración máxima de los registros corregidos fue de 0.34, 0.34 y 0.2 veces la gravedad para El Centro, Managua y Oaxaca, respectivamente. Adicionalmente, se detectaron efectos de la vibración de la mesa vibradora misma que provocaron un aumento en las ordenadas espectrales para el rango de periodos de interés. Aún con estas dificultades, lo importante fue la comparación cualitativa de los ensayes de los diferentes especímenes probados. En la figura 4.8 se muestra el registro del sismo de Oaxaca de 1973.

Se construyeron tres modelos, de los cuales dos se reforzaron después del ensaye y se volvieron a probar con lo que se consideró que el programa experimental constó de un total de cinco modelos. Dos de los especímenes originales fueron construidos la geometría típica y sin refuerzo adicional. Estos se bautizaron como modelo 1 y 4. La tercer vivienda se construyó con una dala–cadena en la parte superior de los muros ligándolos entre sí; éste se llamó modelo 2. Otro modelo consistió el refuerzo del modelo 1 con una malla 6?6-14/14 y mortero en ambos lados de los muros, se llamó modelo 3. Finalmente el modelo 5 se hizo reforzando con tirantes el modelo 4 que fue el otro espécimen construido sin dala.

La geometría general de los especímenes se presenta en la figura 4.9. Los modelos se configuraron en forma de planta rectangular de 3.15?2.15 m, con una altura en los muros largos de 1.2 m y triángulos en los muros cabeceros para recibir el techo a dos aguas (las longitudes del prototipo o vivienda real representada corresponden a 7.8?5.4m y 3 m de altura, respectivamente). La aceleración se aplicó en dirección del lado corto, es decir paralela a los muros cabeceros (similar a la considerada en los análisis de Bazán, ver sección anterior), y sólo un modelo se ensayó en la dirección del muro largo.

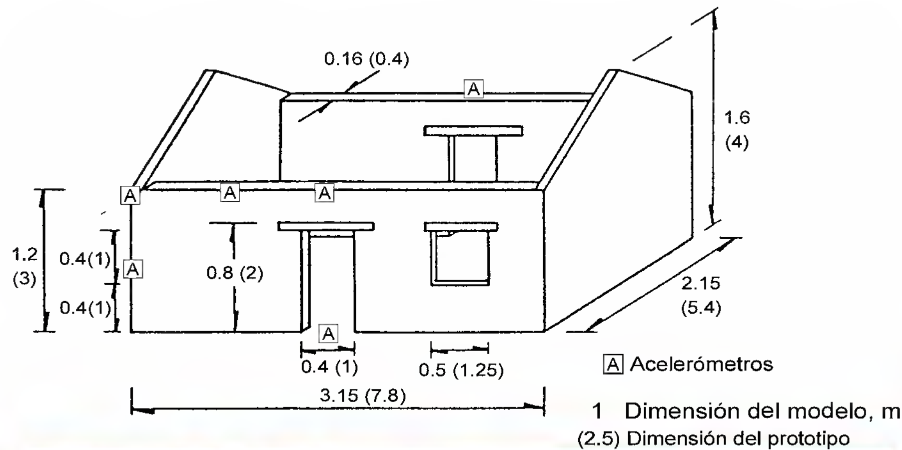




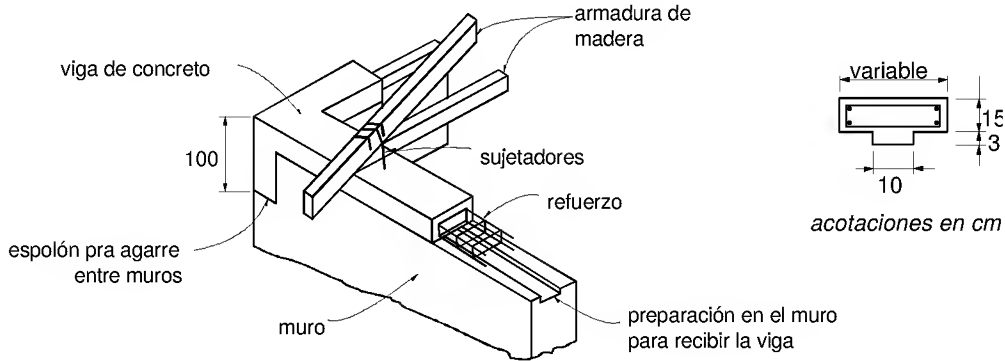
Figura 4.9 Geometría de los modelos

Se contó con aberturas en los muros largos: una ventana en uno y puertas en ambos, todas con dinteles de madera reproducidos a escala. Sólo en los primeros ensayes se usó techo de madera y teja de barro reproducidas a escala, en los restantes se aplicaron masas reproduciendo el peso del techo sobre los muros mediante canales de acero. Los pesos representaron un techo ligero (0.49 kN/m² o 50 kg/m²) y techo pesado (4.9 kN/m² o 500 kg/m²).

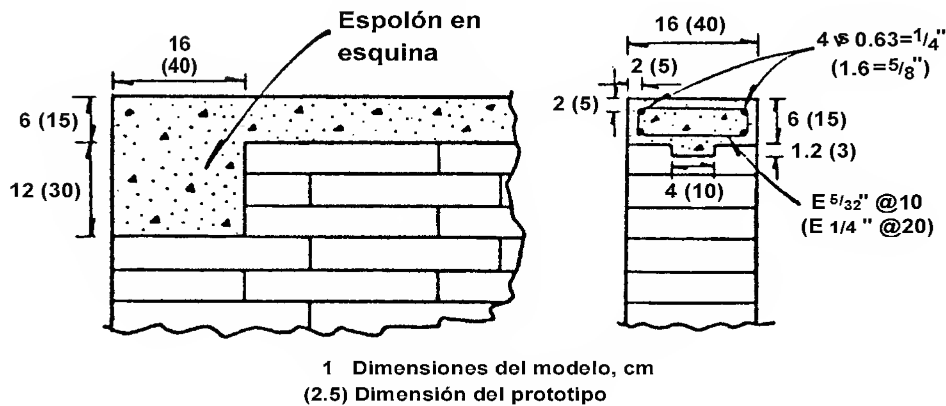
Los modelos se instrumentaron con seis acelerómetros mostrados en la figura 4.10, uno en la base (frente a una puerta), otros dos, cada uno en la parte superior central de los muros largos

(arriba de las puertas), otro en la parte superior de uno de los muros largos pero a un cuarto de su distancia al extremo, y dos más al centro y arriba de una esquina.

En la figura 4.10 se muestran los detalles del refuerzo con dala de concreto considerados en el estudio, éstos provienen de una técnica empleada por la entonces Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas para reconstrucción en zonas afectadas por sismos; asimismo se muestran los detalles específicos usados en este estudio.



a) Dala–cadena de concreto



1 Dimensiones del modelo, cm
(2.5) Dimensión del prototipo

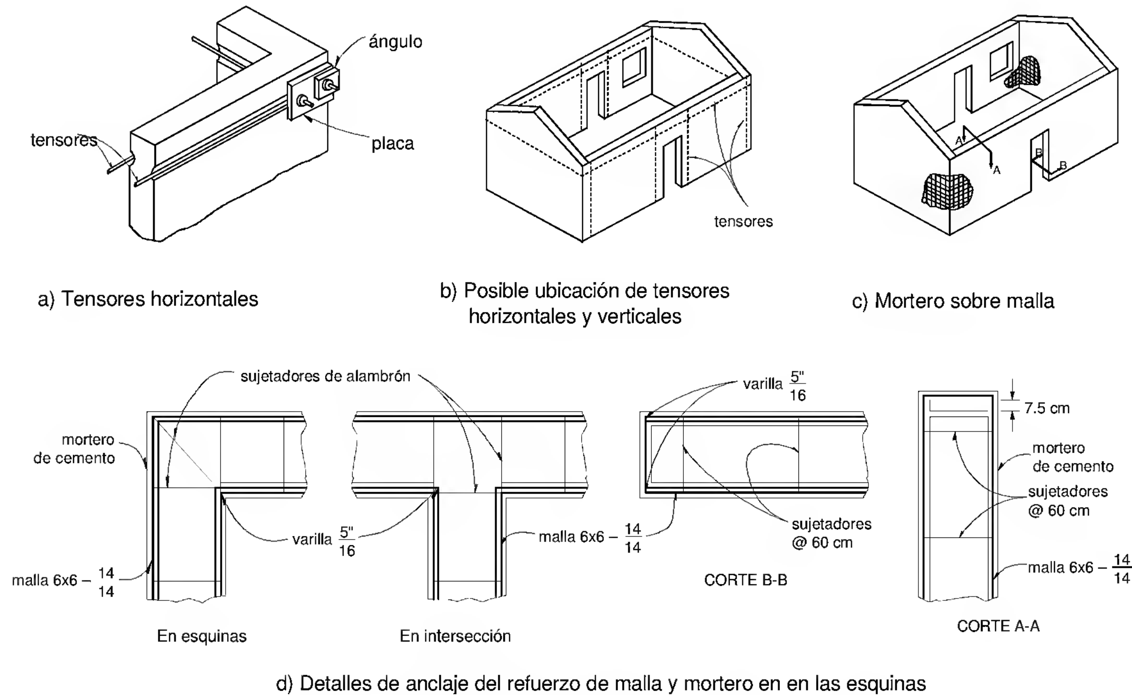
b) Dimensiones de las dalas usadas en el estudio

Figura 4.10 Refuerzo de muros de adobe con dalas de concreto con espolones

En la figura 4.11 se presentan las técnicas para refuerzo mediante tensores y con el uso de malla y mortero. Esta última técnica fue propuesta por Hernández y colaboradores para el refuerzo de casas de adobe dañadas por los sismos de 1975 en Chiapa de Corzo. Los tirantes empleados fueron barras corrugadas de 8 mm de diámetro (5/16 plg.) que equivalían a barras de 12.7 mm (½ plg.) en el prototipo, y se atornillaron en los extremos ligándose a los del muro perpendicular mediante ángulos de madera y tuercas.

El procedimiento de ensaye consistió en someter cada modelo a movimientos que representaban el sismo elegido, con amplitudes reducidas por diferentes factores; la amplitud se aumentaba progresivamente hasta obtener el estado de daño considerado como máximo. Después de cada prueba, se sometía el modelo a vibración libre soltando repentinamente un peso sujeto al

modelo con un cable horizontal y una polea. Esta vibración se registró para determinar el deterioro de las propiedades dinámicas con las pruebas.



a) Tensores horizontales

b) Posible ubicación de tensores horizontales y verticales

c) Mortero sobre malla

d) Detalles de anclaje del refuerzo de malla y mortero en en las esquinas

Figura 4.11 Refuerzo con tensores y con malla y mortero

En la tabla 4.5 se presentan los periodos iniciales de vibración de los modelos, así como la fracción del amortiguamiento crítico.

Tabla 4.5 Periodo natural inicial y amortiguamiento

Modelo	T_0, s	% del amortiguamiento crítico
1	0.079	1.8
2	0.068	1.7
3	0.080	1.5
4	0.072	4.4
5	0.110	4.7
5, longitudinal	0.035	1.9

Se compararon los valores medidos de periodo natural de vibración y de aceleración máxima en el ensaye con los valores teóricos provenientes de los análisis explicados en la sección 4.4, con elemento finito. Para el modelo 1, representante de la estructura en estado original, el periodo calculado fue 0.09 s, que se debe comparar con el medido de 0.079 s. Las aceleraciones resultaron de 1.14 y 1.21 g para la aceleración medida y calculada, respectivamente. Para el modelo 2, que contaba con la dala–cadena, se tuvo un periodo medido de 0.068 y el calculado de 0.07 s, y aceleración de 1.67 y 1.56 g, medida y calculada, respectivamente. Hay que hacer notar que estas aceleraciones en el modelo corresponden a valores menores en el prototipo.

El primer modelo, que no contaba con refuerzo, soportó sin daño grave el 50 por ciento de la intensidad del sismo de El Centro y se llevó prácticamente a la falla con el 90 por ciento del mismo. Se produjeron agrietamientos por flexión en las esquinas de los muros largos, lo cual fue notorio en los instrumentos, después de lo cual estos muros largos comenzaron a vibrar independientemente.

El segundo modelo, que contó con refuerzo de dala, soportó sin daño aparente el 90 por ciento de la intensidad del sismo de El Centro y Managua. Fue necesario llevarlo a 3.5 veces el registro de Oaxaca para llevarlo a la falla. El periodo medido inicial fue 16 por ciento inferior al del modelo sin la cadena (ver tabla 4.5), por lo que la dala–cadena proporcionó un incremento de la rigidez inicial de aproximadamente el 40 por ciento. A diferencia de lo ocurrido en el modelo 1, el daño que se presentó fue por cortante en los muros cabeceros, que aparecieron progresivamente hasta que éstas se propagaron de extremo a extremo. En los muros largos también se formaron las grietas verticales en las esquinas que progresaron hasta la base (fig. 4.12).



Figura 4.12 Estado de daño final del modelo 2

El modelo 3 fue el mismo modelo 1 pero reparado con el sistema de refuerzo de malla y mortero, así como la dala. Los niveles de daño con los sismos de El Centro y Managua fueron menores que los correspondientes al modelo anterior, y fue necesario el 450 por ciento de la intensidad del sismo de Oaxaca para llevarlo a un estado de daño aparatoso, con agrietamiento diagonal del aplanado, pero donde la malla mantuvo la continuidad y preservó a la estructura en condiciones de resistir nuevamente movimientos de la máxima intensidad posible de aplicar.

Se ensayó el modelo 4 (con geometría similar al modelo 1) solamente con el sismo de Oaxaca, hasta llevarlo a un nivel de daño adecuado para repararlo con tensores horizontales. El daño provocado fue similar al del modelo 1, sólo que las grietas verticales en las esquinas se presentaron en los muros cabeceros.

Después del ensaye del modelo 4, éste se reforzó con tirantes y se bautizó como modelo 5. El refuerzo fue suficiente para mantener la liga entre los muros a pesar del agrietamiento, pues permitió que el modelo se sometiera a movimientos del doble de la intensidad que llevó a la falla a los modelos sin refuerzo. Sin embargo, no fue tan eficiente como los otros sistemas de refuerzo ya que se manifestaron niveles de daño considerables con movimientos que los modelos 2 y 3 soportaron sin daño aparente. Se consideró que los tirantes cumplieron su función de mantener ligados a los muros a pesar de se abrieron las grietas originales.

Este modelo se giró posteriormente 90 grados y se ensayó con el sismo paralelo a los muros largos con aberturas. Se verificó que los segmentos de muros entre puertas y ventanas están en condiciones muy desfavorables. En este caso se le aplicó una intensidad máxima del 225 por ciento de la del sismo de Oaxaca, pero desde niveles del 90 por ciento aparecieron las grietas de cortante en los segmentos de muros.

En la tabla 4.6 se presenta el resumen de la intensidad máxima que pudo ser soportada por cada uno de los modelos, relativa a la intensidad que provocó la falla del modelo no reforzado (para el modelo 4 es igual a uno).

De este estudio sus autores concluyen que el procedimiento de refuerzo más eficaz fue a través de una malla de acero clavada a ambos lados del muro y tomando precauciones para garantizar la continuidad y liga entre los muros. Este sistema proporciona además una protección del adobe contra la intemperie manteniendo íntegras sus propiedades con el tiempo. Su inconveniente es el relativo costo de los materiales y, si se construye la dala–cadena, la necesidad de retirar el techo.

Tabla 4.6 Resistencia comparativa de los modelos con diferentes procedimientos de refuerzo

Modelo	Tipo de refuerzo	Intensidad máxima relativa
4 (de comparación)	Ninguno	1
2	Cadena de concreto	2.67
3	Malla y aplanado	3.33
5	Tirantes	1.67

Se verificó que un el uso de tirantes es menos eficiente, pero más económico, y logra un control del daño, y sobre todo, cierta protección contra el colapso. Los tirantes horizontales ensayados mostraron su habilidad para mantener unidos los muros aun ante intensidades sísmicas elevadas. Sin embargo, el nivel de daño resultó alto se recomendó considerar un arreglo de tirantes más completo, incluyendo el refuerzo vertical en los huecos y en las esquinas.

Por su parte, el refuerzo con dala–cadena en el extremo superior fue más eficaz que los tirantes, aunque no impidió un daño importante en las esquinas de los muros en las que se requería un refuerzo vertical adicional. El inconveniente es la necesidad de retirar parcial o totalmente el techo para construirlo.

En este estudio se analizaron sólo los aspectos esenciales de los procedimientos de refuerzo. Existen detalles adicionales que se recomiendan cuidar como son la rigidez del techo en su plano para acercarse al comportamiento de un diafragma, la adecuada liga entre el techo y los muros, el refuerzo local de las aberturas y la fijación de las tejas para evitar su deslizamiento. En cuanto al ensaye en mesa vibradora, se concluyó que a pesar de las limitaciones en la reproducción de los efectos sísmicos, se consideró que constituye una excelente forma de evaluar cualitativamente el comportamiento sísmico y de comparar la eficacia de los diversos procedimientos de refuerzo.

4.6 ENSAYES A ESCALA NATURAL DE MUROS DE ADOBE REHABILITADOS

Entre los estudios más recientes destaca un proyecto de investigación experimental sobre la seguridad estructural de la vivienda rural llevado a cabo por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en colaboración con el CENAPRED. Como parte del estudio referido se llevó a cabo la construcción y el ensaye de tres muros de adobe unido con mortero de arcilla construidos a escala natural.

4.6.1 Geometría de los Modelos y Tipo de Ensaye

Para este estudio se construyeron tres especímenes consistentes en muros cuadrados de 2.5?2.5 m y de 350 mm de espesor. Éstos contaban con una dala superior cuya función era la repartición de las cargas verticales y horizontales. En los extremos de la dala se construyeron

espolones con el objeto de garantizar la transmisión de las fuerzas al puntal de compresión esperado. Un primer modelo, modelo A1, fue ensayado sin refuerzo alguno, llevándolo a una condición de daño que pudiera ser reparada. Posteriormente se rehabilitó dicho modelo mediante el uso malla hexagonal y recubrimiento de mortero cemento–arena y se ensayó nuevamente (modelo A1R); otro de los especímenes se reforzó desde el inicio con malla de alambre soldado con denominación 6?6–10/10 y recubrimiento de mortero (modelo A2); finalmente el modelo A3 se reforzó desde el inicio con una malla hexagonal y mortero.

Aunque la altura del espécimen fue de 2.5 m, no necesariamente representa la altura típica de la vivienda de adobe; por ejemplo, en un estudio realizado para el estado de Guerrero, Salgado y colaboradores (1999) reportan datos de alturas que van de 2.7 a 3.45 m en promedio. Sin embargo, para fines del estudio en laboratorio se consideró adecuada la altura de 2.5 m, misma que se repitió en la longitud del muro a fin de estudiar muros cuadrados. En cuanto al espesor, Salgado encontró valores que oscilan entre 32 y 45 cm para el estado de Guerrero, por lo que se puede considerar un espesor representativo.

Para el citado estudio, y con la finalidad de garantizar que la construcción fuera representativa, se llevaron al laboratorio del CENAPRED las piezas de adobe fabricadas en el estado de Michoacán, y la construcción fue realizada por mano de obra traída de las regiones rurales de dicho estado y con experiencia en este tipo de construcciones. Las piezas de adobe usadas tuvieron dimensiones promedio de 100?250?490 mm y se unieron con mortero elaborado con la misma arcilla con que fueron fabricados los adobes.

Para lograr dar el espesor del muro de 350 mm, fue necesario usar el aparejo mostrado en la figura 4.13 donde se muestra también las dimensiones generales de los especímenes.

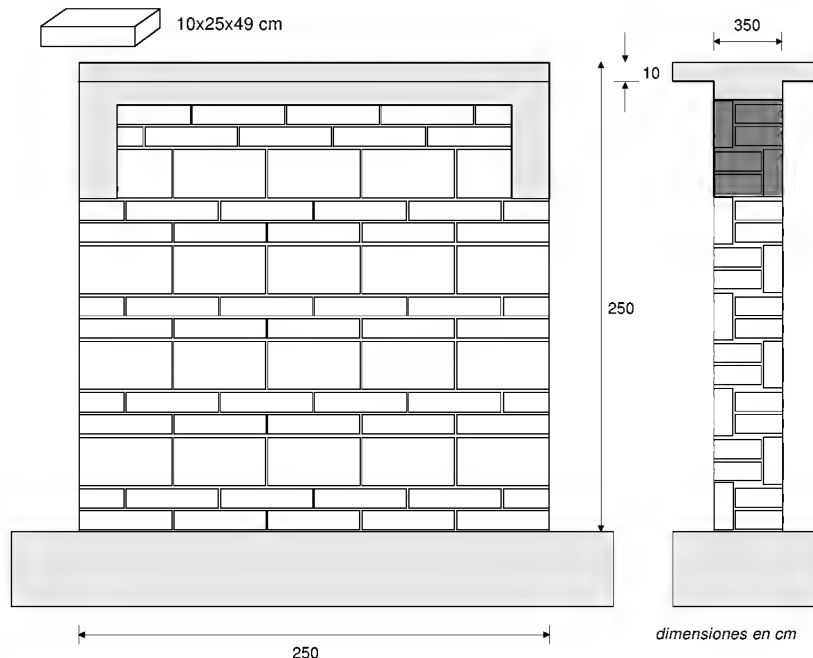


Figura 4.13 Geometría de los especímenes

Paralelamente a la construcción de los muros se elaboraron una serie de muretes y pilas para el ensaye de materiales. Los muretes fueron aproximadamente cuadrados, con dimensión

aproximada de 750x750 mm y espesor de 250 mm (una pieza de espesor). Los lineamientos que se tomaron para elaborar los especímenes corresponden a lo indicado en las normas para estructuras de mampostería del Distrito Federal (DDF 1995), mismas que se han indicado en la sección 2.4.1 del capítulo 2 de este informe. Adicionalmente se hicieron pruebas de compresión en mitades de piezas y cubos recortados de las piezas con arista de 100 mm. Para verificar la resistencia del mortero de lodo usado para pegar los tabiques, así como del mortero de cemento empleado en el recubrimiento, se tomaron muestras cúbicas de 50 mm de arista para el ensaye a compresión. En la figura 4.14 se muestran las imágenes de la construcción de los modelos.



Figura 4.14 Etapas constructivas, muro y murete

El material arcilloso se clasificó como OL (limo o arcilla orgánica de baja compresibilidad). El mortero del recubrimiento usado fue tipo III con relación cemento:arena de 1½:4½ medido en volumen. La resistencia obtenida de los ensayes de piezas, pilas y muretes de adobe se resumen en la tabla 4.7, y la prueba de muretes a compresión diagonal se muestra en la figura 4.15.

Tabla 4.7 Características mecánicas de los materiales usados

Característica	Valor
Resistencia a compresión de piezas de adobe	f_p^* = 27 kg/cm²
Resistencia a compresión de pilas de adobe	f_m^* = 6.3 kg/cm²
Resistencia a compresión diagonal de muretes de adobe	v_m = 0.3 kg/cm²
Resistencia a cortante en el modelo A1 (sin mortero)	v_m = 0.34 kg/cm²
Resistencia a compresión diagonal de muretes con recubrimiento de mortero en ambas caras[1]	v_m = 2.7 kg/cm²
Resistencia a cortante en los modelos A2 y A3 (con mortero)[1]	v_m = 2.8 kg/cm²

[1] Esfuerzo calculado con el espesor del adobe (t = 35 cm) sin incluir el espesor del mortero

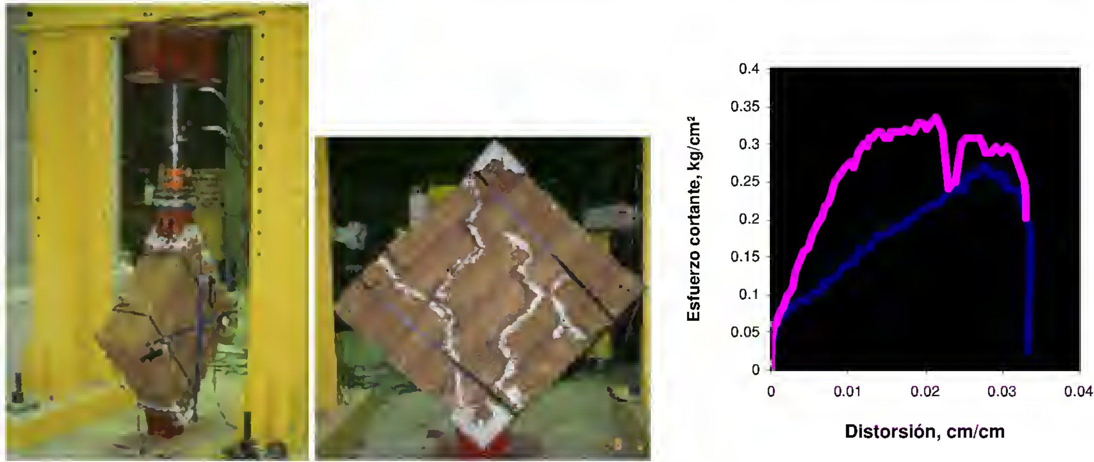


Figura 4.15 Resultados del ensaye a compresión diagonal de muretes sin recubrimiento de mortero

Para la rehabilitación se usaron dos tipos de mallas, la primera fue una malla hexagonal (tipo gallinero) hecha con alambres calibre 20 (0.89 mm de diámetro) con 50.8 mm de abertura. La resistencia de fluencia, tomada como $f_y = 0.88f_t$ donde f_t es la resistencia última, se encuentra entre f_y = 5570 y 7430 kg/cm² (547-729 MPa). El otro tipo de malla usado fue la malla de alambre soldado tipo 6?6–10/10, es decir alambres calibre 10 (3.43 mm de diámetro) separados cada 152 mm (6 pulgadas). La cuantía de acero se calcula como $p_h = A_{sh}/(s\ t)$, donde A_{sh} es el área de alambres en las dos caras del muro, s la separación de alambres medida verticalmente y t el espesor original del muro (sin recubrimiento). En este caso, para la malla hexagonal se tuvo una cuantía de 0.007%, mientras que para la malla de alambre soldado fue de 0.035%.

El ensaye de los muros consistió inicialmente en la aplicación de cargas horizontales cíclicas reversibles a la altura de la dala superior. Para tener la posibilidad de aplicar cargas verticales se usados dos gatos de 50 t de capacidad colocados verticalmente sobre el espécimen y reaccionando contra un marco de carga como se muestra en la figura 14.16; en la misma figura se muestra el arreglo de la instrumentación usado.

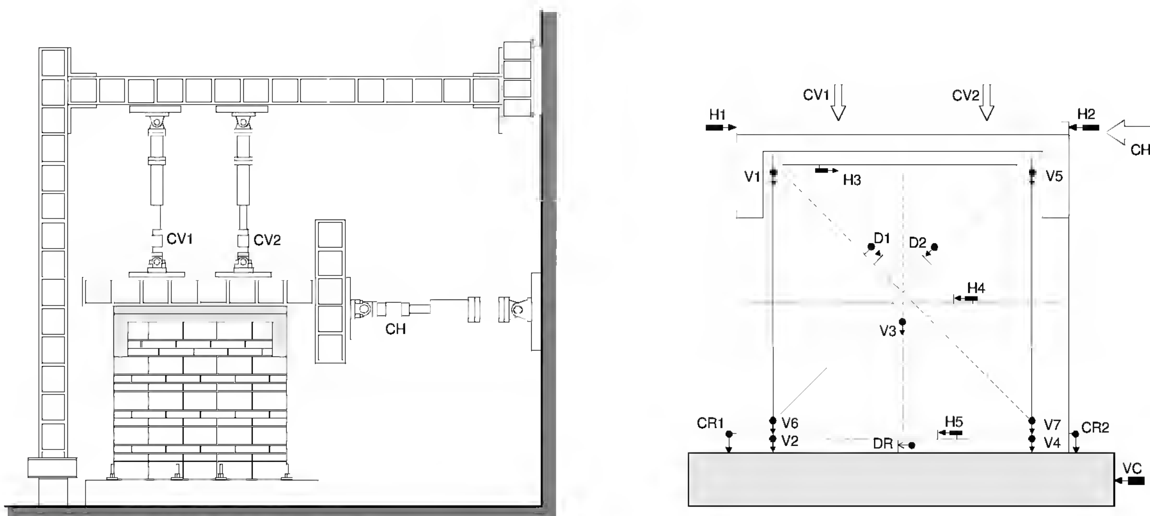


Figura 14.16 Marco de carga y arreglo de la instrumentación

4.6.2 Resultados de los Ensayes

En la figura 14.17 se presenta el patrón de agrietamiento final así como la curva de histéresis distorsión de entrepiso contra fuerza cortante aplicada con el gato hidráulico horizontal. La distorsión se calculó como la relación del desplazamiento horizontal medido a nivel de la losa y la altura del muro. La fuerza cortante máxima fue de 3 t por lo que el esfuerzo cortante (fuerza horizontal entre área en planta) resultó ser de 3000/(250?35) = 0.34 kg/cm² (0.034 MPa).

La falla del modelo A1 se presentó por agrietamientos en las juntas de mortero de lodo en forma escalonada (fig. 4.17), hasta llegar al deslizamiento relativo de las piezas. Se suspendió la prueba para poder rehabilitar el muro. La rehabilitación se realizó con malla hexagonal. De un lado del muro se colocó previamente un aplanado de mortero de 20 mm para estudiar el efecto de colocar un aplanado previo; después de tres días se colocó la malla tanto en el lado con aplanado como el otro lado que no se había aplanado. La malla se colocó envolviendo el modelo y se cubrió con mortero de cemento dando aproximadamente 30 mm de espesor final de cada lado.

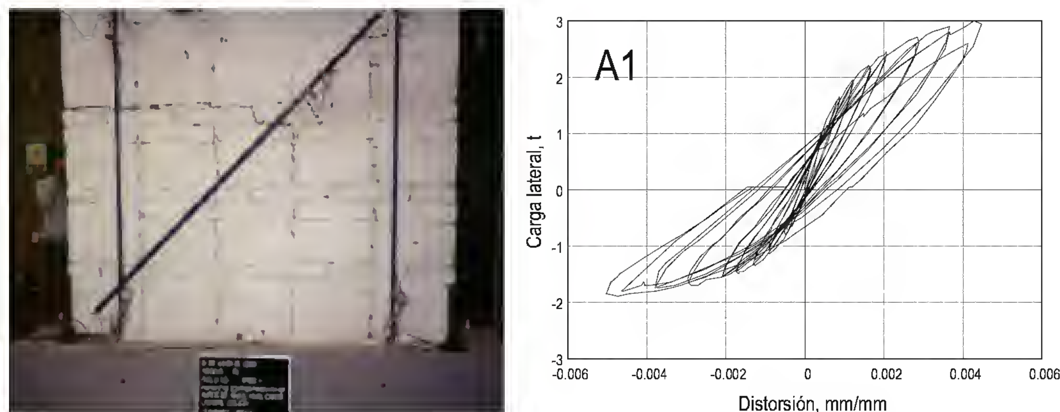


Figura 4.17 Patrón de agrietamientos y curva de histéresis del modelo A1

El espécimen reforzado se bautizó como A1R y se ensayó con la misma metodología que el original. La resistencia a cargas laterales de este modelo superó la del muro original, sin embargo, se percibió un cambio total en el modo de falla: debido al aumento en la resistencia a cortante, en vez de fallar por tensión diagonal, el modelo comenzó a deslizar sobre su base. La carga máxima alcanzada hasta el deslizamiento fue de 4.6 t, lo cual da un esfuerzo cortante de 0.52 kg/cm² (0.05 MPa) calculado en base al espesor del adobe de 35 cm, o 0.46 kg/cm² si se usa el espesor completo de 40 cm que incluye el mortero. El peso estimado del espécimen incluyendo la viga de acero que gravitaba sobre él fue de aproximadamente 6 t, por lo que el coeficiente de fricción entre el adobe y la viga de cimentación de concreto fue de ? = 0.76.

En vista de lo anterior se rebautizó al espécimen como A1RV en el cual se aplicaron tres niveles de carga vertical según se requirió cuando el deslizamiento en la base impedía aplicar más carga horizontal. Los incrementos de carga vertical (adicionales a las 6 t de peso propio) fueron de 10, 20 y 40 t, para los cuales se llegó a cargas horizontales de 8.5, 13 y 18.2 t, respectivamente (relación de carga vertical a lateral de ? =0.53, 0.5 y 0.4, respectivamente) (fig. 4.18). El ensaye concluyó con el daño en el recubrimiento con agrietamientos y desconchamientos en forma

horizontal en la cara sin recubrimiento previo, y agrietamientos inclinado siguiendo la diagonal en la cara donde se colocó una capa previa de mortero antes de la malla.

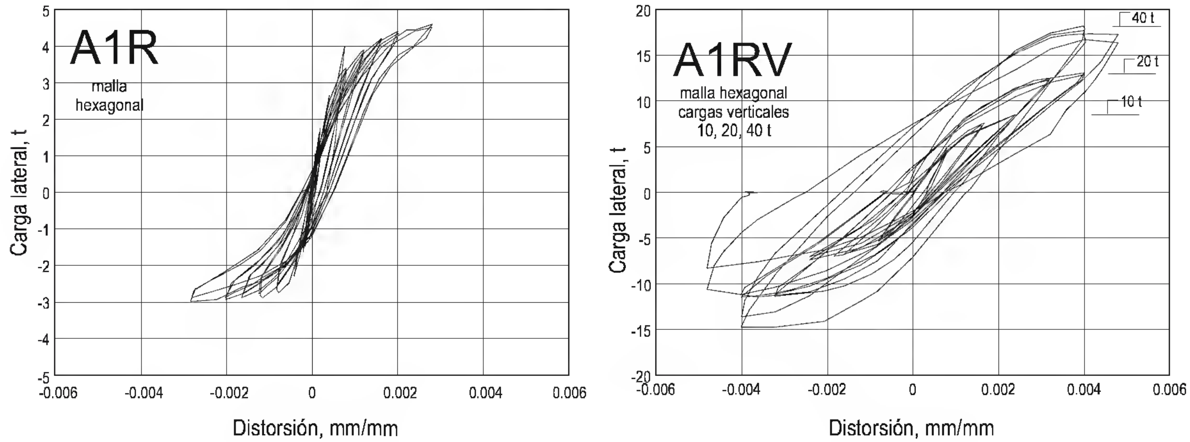


Figura 4.18 Resultado de los ensayes A1R y A1RV

La conclusión parcial en este momento del programa experimental fue que la técnica de rehabilitación usada aumentó tanto la resistencia a fuerza cortante que se cambió el modo de falla de cortante a deslizamiento de cuerpo rígido.

Los dos modelos restantes fueron el A2, reforzado con malla de alambre soldado 6?6-10/10 y el A3, reforzado con malla hexagonal de forma idéntica al modelo A1R. En ambos casos se siguió la técnica aplicada en el modelo A1R, colocando una capa de mortero previa en sólo una de las caras del muro, para después sujetar las mallas y cubrir con mortero para completar el espesor de aproximadamente 30 mm por cara (fig. 14.19).

Para sujetar las mallas se recurrió a grapas de acero galvanizado del tipo usado para sujetar los alambres de púas, clavadas con martillo. La grapas se colocaron tanto contra las piezas de adobe en un lado del muro como contra el aplanado de mortero previamente colocado en el lado contrario. Estas grapas fueron de calibre 9 (3.76 mm de diámetro), de 38 mm de largo (1½ plg.) y con esfuerzo de fluencia nominal entre 3410 a 4650 kg/cm² (335 a 456 MPa). Las grapas se colocaron a cada 300 mm en dirección vertical y horizontal ubicándolas en la intercepción de alambres, es decir, se colocaron cada dos alambres, con lo cual la cuantía de conectores fue aproximadamente de diez grapas por metro cuadrado (10 grapas/m²).



Figura 14.19 Refuerzo con malla de alambre soldado, malla hexagonal y grapa usada

Considerando el comportamiento del primer modelo rehabilitado, a los dos modelos restantes se les adicionaron unas placas a los costados en la parte inferior del muro, de tal forma que sirvieran como topes para evitar el deslizamiento como cuerpo rígido. Después de la aplicación de algunos ciclos de carga horizontal reversible, se adaptó la configuración de los gatos hidráulicos para realizar una prueba monótona de compresión diagonal, mediante la aplicación de carga creciente de un gato vertical y del gato horizontal simultáneamente. Ambos gatos aplicaron su carga en la esquina superior de los muros. Las curvas resultantes carga lateral contra distorsión de entrepiso se presentan en la figura 14.20.

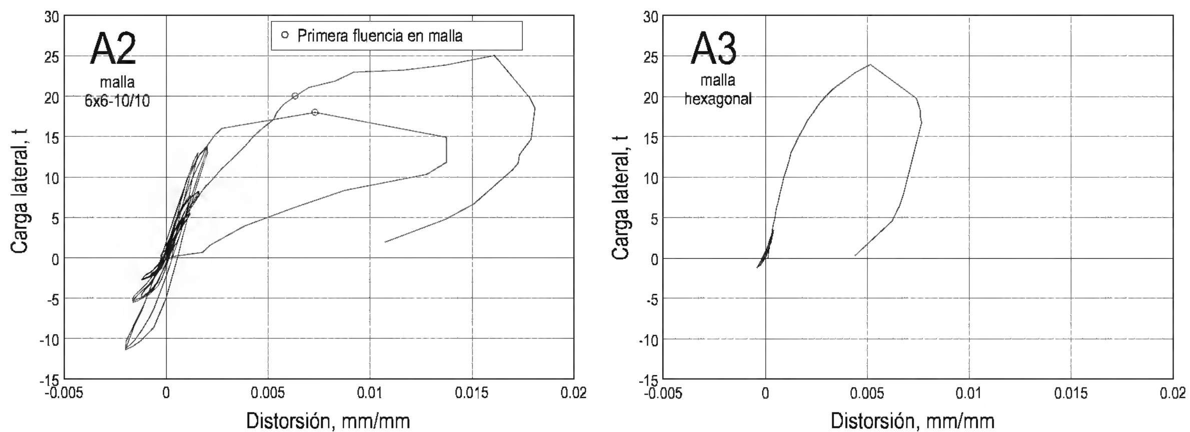


Figura 14.20 Resultados de los modelos A2 y A3

La resistencia lograda para los modelos A2 y A3 fueron de 25 y 23.9 t, respectivamente. Esto corresponde a un esfuerzo de compresión diagonal de 2.86 y 2.73 kg/cm², (0.28 y 0.27 MPa) calculado con el espesor t de 35 cm (o 2.5 y 2.4 kg/cm² si se toma $t = 40$ cm).

4.6.3 Conclusiones de los Ensayes en Muros de Adobe

1) La falla en el muro original estuvo dominada por deformaciones de cortante y por grietas entre el mortero de lodo y las piezas.

2) La resistencia dada por el recubrimiento de mortero fue tan elevada que cambió el modo de falla de cortante a deslizamiento de cuerpo rígido.

3) Una vez modificada la prueba para evitar el deslizamiento, la resistencia a carga lateral lograda en los modelos reforzados fue ocho veces superior a la del modelo de control.

4) Se logró el trabajo de la malla de alambre soldado, e incluso su fluencia, pero sólo a altas deformaciones (0.006), para lo cual se tuvo que modificar el tipo de ensaye obligando a la falla en compresión diagonal.

5) La pérdida de resistencia en el modelo con malla hexagonal se dio a deformaciones próximas a 0.005 con agrietamiento inclinado del mortero y fractura de la malla. En el espécimen con malla de alambre soldado se contó con el trabajo de la malla para altas distorsiones, aumentando la capacidad de deformación del modelo, pero no produjo mayor aumento en la resistencia.

6) Por lo anterior, es factible el uso de malla hexagonal tipo gallinero como complemento a un recubrimiento de mortero, pero teniendo conciencia de que no es un refuerzo estructural, que la resistencia estará dominada por la resistencia a tensión del mortero y que al llegar a la falla se perderá súbitamente la capacidad de carga.

7) La aplicación de una capa de mortero antes de la malla tuvo algunas ventajas, como lograr un agrietamiento diagonal más controlado, por lo que puede tomarse como una recomendación constructiva.

8) Se observó un comportamiento adecuado con el uso de 10 grapas por metro cuadrado (grapas @ 30 cm vertical y horizontal).

9) El uso de malla estructural (de alambre soldado) será necesario para controlar otros tipos de falla, como por ejemplo evitar grietas verticales en esquinas o para anclar la estructura en la cimentación dando resistencia a flexión en el plano y fuera del plano del muro.

CAPÍTULO 5

DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO Y TIPOS DE DAÑO

5.1 COMPORTAMIENTO GENERAL

La vivienda de adobe, aunque con propiedades de aislamiento térmico y acústico excelentes, ha demostrado un pobre comportamiento cuando se somete a acciones sísmicas. Una característica del material es su baja resistencia a tensión, lo que se traduce en agrietamientos por tensión diagonal, por corte o verticales que pueden conducir al colapso parcial o total de la estructura.

Las propiedades mecánicas de la tierra, apisonada o en adobe, tienen grandes variaciones según las características del suelo con el que se fabrican y el cuidado en su elaboración. La adición de paja, estiércol y algún otro material orgánico aglutinante tiene el propósito de disminuir la contracción del material y aumentar su resistencia al intemperismo. El peso volumétrico del adobe se puede considerar aproximadamente como 17.6 kN/m^3 (1.8 t/m^3); la resistencia a la compresión puede variar entre 0.49 y 2 MPa (5 y 20 kg/cm^2); el módulo de elasticidad se encuentra por el orden de 294 MPa (3000 kg/cm^2); la resistencia a tensión se encuentra entre 0.025 y 0.1 MPa (0.25 y 1 kg/cm^2) y la resistencia a cortante se ha encontrado del orden de 0.05 MPa y menores (0.5 kg/cm^2 y menores). Estas resistencias, notablemente bajas, no suelen ser críticas para la capacidad estructural de las construcciones, tanto como lo son el problema de la degradación del material y la dificultad de conectar los muros entre sí y con los techos (Meli, 1998).

Los muros de adobe son generalmente pesados y relativamente rígidos (por lo menos más rígidos que marcos). Lo primero hace que se generen fuerzas de inercia elevadas, ya que éstas dependen del producto de la masa por la aceleración. Lo segundo hace que el período fundamental de vibración, que es típicamente entre 0.1 y 0.4 s, se encuentre en el intervalo donde se ubican los períodos dominantes de los sismos de epicentros cercanos. Por esta razón, las aceleraciones que se inducen en estas construcciones son elevadas y los daños llegan a ser considerables. La debilidad principal de cualquier estructura de mampostería consiste en su muy baja resistencia en tensión, de la que deriva la imposibilidad de realizar uniones efectivas entre los distintos elementos estructurales. La incapacidad de transmitir fuerzas de tensión o momentos flexionantes significativos entre uno y otro elemento, no permite canalizar adecuadamente las fuerzas de inercia que se generan en los sismos a los elementos más idóneos para resistirlas (muros paralelos a las fuerzas).

De los estudios revisados, así como de las experiencias registradas durante los sismos en las viviendas de adobe, se ha identificado los modos principales de falla de estas estructuras. Para fines prácticos se clasifican como estructuras de mampostería y están sujetas a las recomendaciones y normatividad de este tipo de edificación. Sin embargo, presentan debilidades adicionales que en las estructuras de mampostería moderna han sido corregidas, por lo que dichas características deben ser atendidas para reducir la vulnerabilidad de las mismas, ya sea en construcciones nuevas como en la rehabilitación de vivienda existente.

5.1.1 Liga entre Muros

Además de las propiedades mecánicas y de resistencia, la principal diferencia de estructuración entre una construcción de mampostería moderna y una vivienda típica de adobe radica en la liga entre elementos, tanto entre muros perpendiculares como entre muros y sistema de

techo y cimentación. En la mampostería moderna la liga entre muros se logra mediante dalas o cadenas y castillos de concreto reforzado o mediante refuerzo interior consistente en barras o alambres de acero colocados dentro de los alvéolos de piezas huecas o en las juntas horizontales de mampostería.

Una manera sencilla de describir el efecto del refuerzo de la mampostería sería mediante el ejemplo de un pequeño cobertizo construido con cinco cartas de naipes (Hernández, 1998), cuatro de ellas como muros y otra como techo. Al colocarlas, las cartas están aparentemente estables, hasta que un ligero soplido o un pequeñísimo movimiento de la mesa donde se encuentran produce el colapso ya que no hay ninguna liga entre ellas. Este símil podría ocurrir si no se unen adecuadamente los muros entre sí y con la losa, donde movimiento sísmicos ligeros, vientos fuertes o empujes de tierra o agua podrían hacer colapsar a la construcción. He aquí la necesidad de dar continuidad a los distintos elementos, que para el caso del ejemplo, sería uniendo las cartas mediante una cinta adhesiva; de esta manera se tiene mucho mayor rigidez y resistencia del conjunto. En el caso de una construcción real, esta continuidad la dan las dalas y castillos, cuya función primaria será mantener unidos a los elementos.

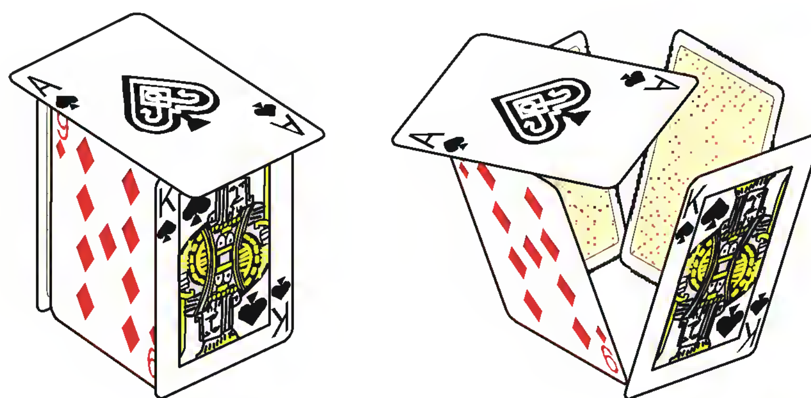


Figura 5.1 Colapso de castillos de naipes por falta de liga en los bordes

Es importante hacer notar que después de que ocurre un cierto nivel de daño en la mampostería, el concreto de los castillos y el acero de refuerzo contribuyen a soportar cargas, por lo que son la última línea de defensa ante cargas horizontales, y son responsables de la estabilidad ante cargas verticales cuando se tiene daño severo en la mampostería. Aún así, la función de estos elementos es inicialmente la liga entre los elementos.

En el estudio teórico realizado por Bazán y colaboradores (Bazán, 1978), descrito con detalle en la sección 4.4 se determinó que el modo fundamental de vibración se relaciona con la deformación a flexión de los muros largos (movimiento de volteo fuera del plano), de manera que las vibraciones inducen momentos flexionantes críticos en las esquinas superiores de los muros las cuales se agrietan progresivamente hacia abajo, de manera que el muro frontal comienzan vibrar como un voladizo, ocurriendo el volteamiento cuando la altura de la grieta del muro es suficiente para que la resultante de fuerzas caiga fuera de la sección del muro. El volteamiento ocurre casi siempre hacia fuera, ayudado por el coceo del techo (el empuje horizontal hacia afuera del sistema de techo). Este modo de falla, que se identifica por las grietas verticales en las esquinas, es el que se ha observado con mayor frecuencia a raíz de los sismos como quedó claramente evidenciado en la revisión presentada en el capítulo 3.

Menos frecuente es la falla por cortante o por tensión diagonal en los muros, pero se puede presentar en viviendas en que la longitud no soportada de los muros es pequeña, o donde los techos proporcionan restricción al volteo fuera del plano, por ejemplo en estructuras de adobe de más de un piso o con sistema de piso que forme un diafragma suficientemente rígido. El modo de falla por cortante es propiciado frecuentemente por la existencia de aberturas tales como puertas y ventanas que limitan segmentos cortos de muros. En la figura 5.2 se esquematiza la falla por volteo y por cortante.

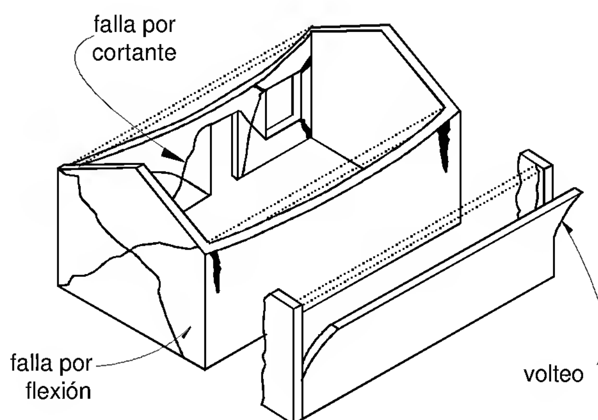


Figura 5.2 Tipos de falla en estructuras de adobe

5.1.2 Trabajo de un Diafragma Rígido

Para que los muros trabajen efectivamente resistiendo las fuerzas horizontales contenidas en su plano, y que la falla sea por tensión diagonal o cortante –como se acepta en las estructuras modernas de mampostería– es necesario que la fuerza sísmica del entrepiso se transmita eficientemente a dichos muros. Esto encuentra varias dificultades ya que por un lado la mayor parte de la masa inercial de la edificación se encuentra en los mismos muros (normalmente robustos y pesados) por lo que los muros largos oscilan directamente fuera de su plano; y por otro lado el tipo de sistema de techo, que no forma un diafragma rígido, no permite transmitir las cargas a los elementos resistentes según la dirección de las acciones (muros paralelos a las fuerzas).

Una diferencia básica en el comportamiento sísmico de una edificación moderna y una vivienda de adobe se deriva del tipo de sistema de techo. Un sistema de techo o piso rígido en su plano constituye un diafragma que se mueve como una sola unidad. Tal es el caso de losas de concreto o de pisos a base de vigas y tablones, si estos últimos están conectados rígidamente a las vigas. En la mayoría de los sistemas de techo de las viviendas de adobe, el soporte lo dan las vigas de madera, las cuales pueden moverse una con respecto a la otra, de modo que no constituyen un diafragma.

Un diafragma transmite las fuerzas horizontales de inercia a los elementos más rígidos que tienen capacidad para resistirla. Un techo que no forma un diafragma, transmite las fuerzas de inercia a los muros sobre los que se apoya y tiende a voltearlos.

En la figura 5.3 se esquematiza el comportamiento de dos sistemas de techo, uno que trabaja como diafragma y otro que no lo hace. En el primero las fuerzas inerciales por la masa de todo el

sistema de techo, así como de una cierta parte de la inercia de los muros, se transmiten a través del diafragma a los muros laterales que son paralelos a las fuerzas horizontales. De esta manera las acciones pueden ser más eficientemente tomadas por dichos muros que trabajarán a flexión y cortante en su plano y, prácticamente, se puede despreciar cualquier efecto en los muros transversales donde las fuerzas que tenderían al volteo fuera del plano de los mismos.

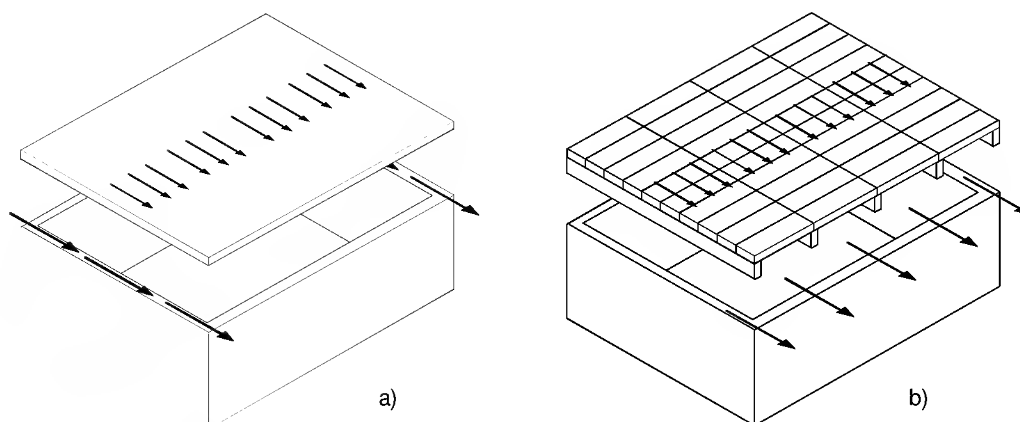


Figura 5.3 Comportamiento sísmico de sistemas de piso: a) diafragma; b) sistema que no se comporta como diafragma (Meli, 1998)

Sin embargo, en el caso de no contar con diafragma rígido, como en la figura 5.3.b, las fuerzas de inercia producidas por un evento sísmico se transmitirán directamente por cada viga de madera hacia los muros de apoyo (muro largo en la figura). De esta forma dichos muros no sólo tendrán que soportar las fuerzas sísmicas debidas a su propia masa, sino que tendrán también el efecto de las fuerzas de inercia del techo, produciendo los modos de falla ya discutidos de agrietamiento vertical en las esquinas que eventualmente produciría el volteo, o un colapso parcial por la falla en la parte central del muro en el caso de muros muy largos. El volteo de los muros o el colapso parcial se acompañarán de la caída del sistema de techo.

5.2 TIPOS PRINCIPALES DE FALLA

5.2.1 Agrietamiento Vertical en Esquinas

Como ya se ha mencionado, este es uno de los más comunes tipos de fallas encontrados en la revisión de estructuras de adobe dañadas por sismos. El comportamiento de estas estructuras que llevan a este tipo de daño han sido ya discutido y se resumen en que, al carecer de liga entre muros adicional a la intercalación de piezas en las esquinas, los esfuerzos de tensión provocados por la oscilación de los muros fuera de su plano (castillo de naipes) inician este agrietamiento, producido por la tendencia al volteo de los muros y ayudado por empujes debido al sistema de techo (fig. 5.4).

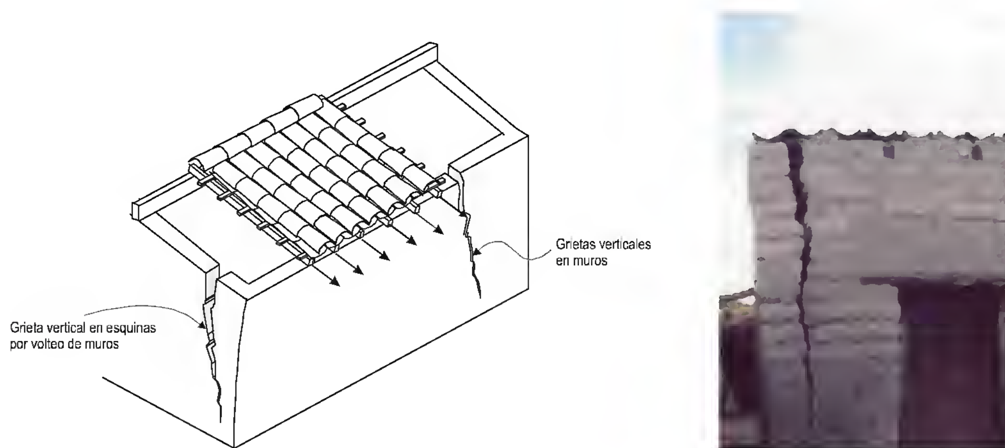


Figura 5.4 Agrietamiento vertical en esquinas

Cabe hacer notar que algunos autores de artículos técnicos sobre daño por sismo en viviendas de adobe han interpretado erróneamente que grietas verticales en esta zona se deben a la falta de traslape de las piezas durante la construcción. En realidad prácticamente siempre se construye con el traslape correcto de piezas, pero los esfuerzos de tensión provocan la fractura de las mismas produciendo en ocasiones grietas casi perfectamente verticales.

Una variable de la falla en esquinas es la que se ha bautizado como dislocamiento de esquinas. En este caso se trata nuevamente de efectos debido a la concentración de esfuerzos en las esquinas de las viviendas. En estos casos, una vez iniciado el agrietamiento en uno de los muros que llegan a la intercepción, el tramo debilitado de esquina es más vulnerable a nuevos movimientos por lo que en ocasiones ocurre el desplome parcial de la esquina (fig. 5.5). Los medios para evitar este tipo de daño se describen en el siguiente capítulo, pero en general consisten en proporcionar elementos de liga que mantengan unidos a los muros (castillos y dalas, elementos de madera, malla de alambre y mortero, o incluso tensores de acero).

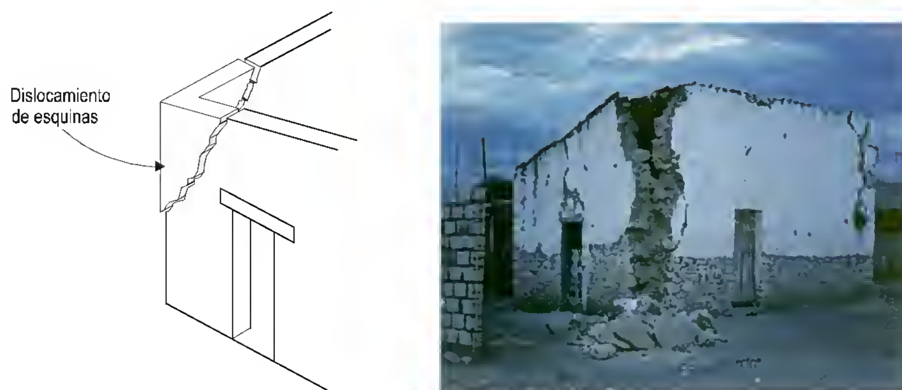


Figura 5.5 Dislocamiento de esquinas

5.2.2 Volteo Central en Muros Largos

Nuevamente tenemos un tipo de falla propiciado por la oscilación y tendencia al volteo fuera de su plano de los muros, ayudado por las fuerzas horizontales que le produce el sistema de techo

cuando no forma diafragma y que se apoya sobre estos muros. Se pueden considerar como muros largos a aquellos cuya relación de longitud no apoyada a altura es del orden de dos o superior.

La variante con respecto al tipo de falla en esquinas consiste en que en este caso se trata de muros relativamente largos sin apoyos intermedios (apoyos como serían los muros transversales interiores). Para esta condición el efecto de volteo en la parte central, alejado de los muros cabeceros que sirven de apoyo, puede producir agrietamientos verticales y eventualmente el colapso de la parte central iniciando en la parte superior del muro. En la figura 5.6 se esquematiza este tipo de falla (ver también figura 3.19).

La solución para evitar este tipo de falla radicará en técnicas para restringir el desplazamiento en la parte superior de los muros.

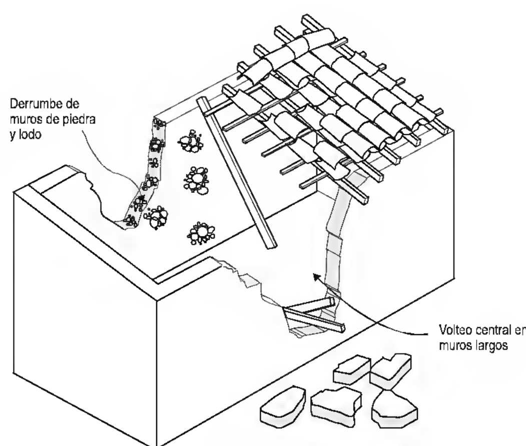


Figura 5.6 Volteo central en muros largos

5.2.3 Caída de Techos

Se han observado indicios de que en ocasiones el colapso se ha iniciado por la caída del techo, ya sea por fallas locales en las conexiones o por la falla de la madera misma por encontrarse muy deteriorada. También se ha presentado la falla por el deslizamiento de los elementos del techo sobre los muros a los que están fijados en forma muy precaria (Hernández, 1979). El desplazamiento de los muros por la tendencia al volteo fuera de su plano, como se ha descrito en las secciones anteriores, es una causa adicional de que las vigas del sistema de techo pierdan el apoyo y caigan. También es frecuente que se presente una falla local por el empuje de las vigas de techo sobre el muro, lo que da lugar a una perforación local del muro y a la caída parcial del techo.

Adicionalmente se presenta con frecuencia una falla parcial por la caída de las tejas, que ocurre aún para sismos de moderada intensidad, debido a que las tejas se deslizan por efectos de las aceleraciones verticales y horizontales y caen a veces dentro de la misma vivienda.

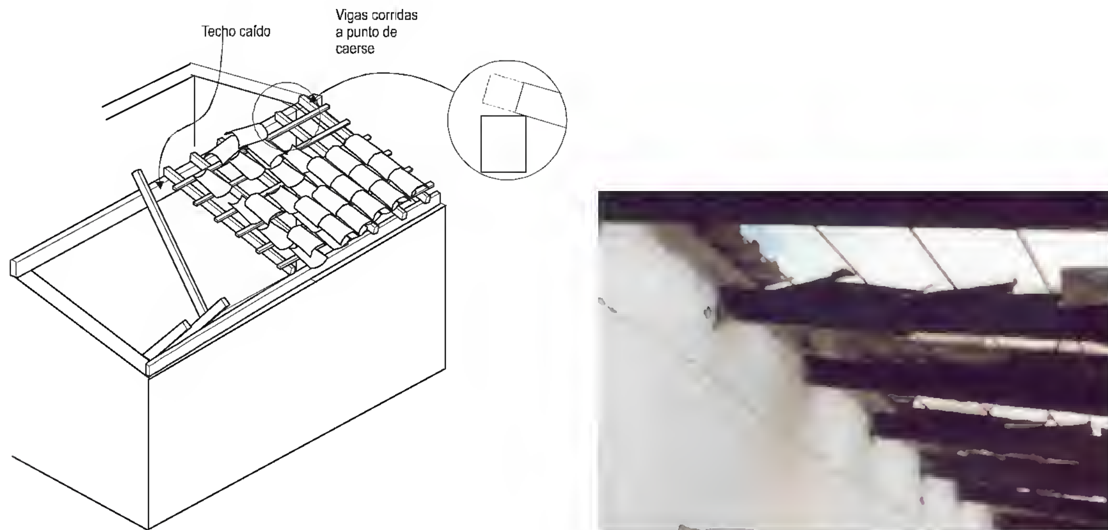


Figura 5.7 Caída de techos

5.2.4 Agrietamiento Inclinado

Cuando la estructuración de la vivienda permite transmitir las fuerzas horizontales a los muros paralelos a la acción del sismo, se puede presentar el agrietamiento por tensión diagonal en los muros. Este es el tipo de falla que se acepta generalmente en las estructuras modernas de mampostería, mismo que se considera en los métodos simplificados de análisis sísmico para construcciones a base de muros. Asimismo, los conocimientos sobre el comportamiento de muros de mampostería en general pueden ser aplicados para estimar y revisar la falla de los muros ante fuerzas cortantes en su plano.

En el caso del uso de castillos y dalas de concreto reforzado, se puede considerar válidos los lineamientos existentes para estructuras de mampostería para su análisis y diseño, a menos que se cuente con información más detallada, como por ejemplo los resultados de ensayes de laboratorio de muretes reducidos o de muros a escala natural (ver sección 4.6 del capítulo anterior).



Figura 5.8 Fallas de cortante por tensión diagonal

En general el agrietamiento inclinado se llega a dar cuando es posible transmitir las fuerzas sísmicas a los muros paralelos a las acciones y cuando se cuenta con una relativamente baja densidad de estos muros. En el caso de construcciones de más de un nivel (caso poco frecuente) la relativa rigidez del sistema de piso formado por vigas y tablones de madera puede permitir una apreciable acción de diafragma, sumada al hecho de que se tendrán mayores fuerzas horizontales sobre los muros de la planta baja (figura 5.9).

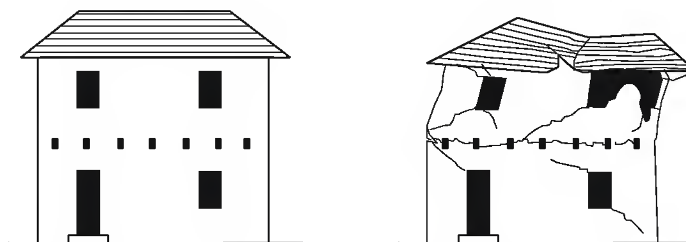


Figura 5.9 Falla por cortante en construcciones de dos pisos

La presencia de grandes aberturas en puertas y ventanas no sólo reduce sustancialmente el área resistente, sino que introduce concentraciones de esfuerzos en las esquinas de las aberturas. Es frecuente observar agrietamiento diagonal en zonas de muros entre aberturas, y en casos extremos el colapso de dichos muros.

También se produce este agrietamiento por otras causas como por ejemplo por la presencia de asentamientos diferenciales en la cimentación. En estos casos las grietas inclinadas normalmente se presentan en una sola dirección, lo que permite identificar la zona de la construcción que ha sufrido el sentamiento.

5.2.5 Otros tipos de Fallas

Existen otros tipos de fallas locales, como por ejemplo la caída de pretiles o el agrietamiento sobre los cerramientos de las aberturas. En el caso de los pretiles la falla se debe esencialmente a la tendencia al volteo fuera de su plano, tal y como ocurre también en bardas. Se da poca importancia a este tipo de falla, pero no es nada despreciable pues puede causar daño a personas que transiten por la parte inferior del muro. En sismos recientes la ocurrencia de daño moderado en pretiles de construcciones de adobe en zonas urbanas fueron causa de cierre temporal de los inmuebles y de molestias al acordonar las banquetas evitando el paso, lo cual se deben tomar en consideración y no despreciar el efecto del sismo en estos elementos.

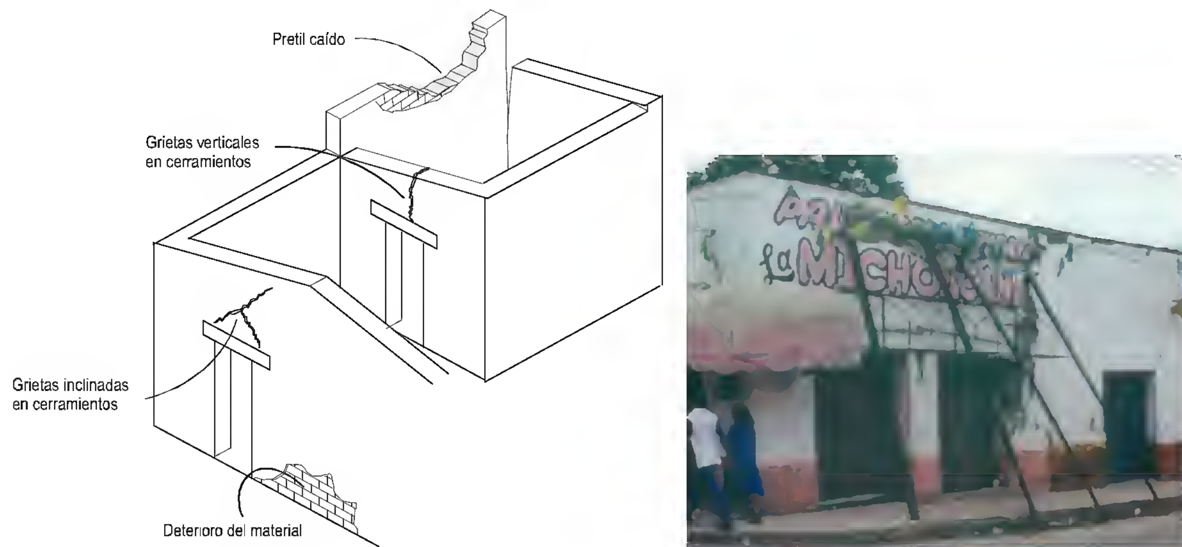


Figura 5.10 Grietas en cerramientos y daño en pretiles

El daño en cerramientos se debe a las condiciones vulnerables de estos elementos al constituir una zona débil del muro. Algunos autores han recomendado el uno de una longitud mínima de apoyo de las vigas de madera que sirven para el cerramiento del orden de 500 mm (SAHOP, 1977). Aunque el agrietamiento en cerramientos puede ser inclinado debido a efectos de esfuerzos cortantes, generalmente se presenta el colapso por la acción del techo hacia fuera del plano del muro acompañada de otros factores de debilidad como la cercanía a esquinas (fig. 5.11).



Figura 5.11 Colapso de cerramiento (Juárez, 2000)

CAPÍTULO 6

TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN DE LA VIVIENDA DE ADOBE

6.1 INTRODUCCIÓN

En nuestro país resulta preocupante estudiar las estadísticas de daños en viviendas de adobe producidos por sismos moderados e intensos, tanto recientes como de antaño. La realidad demuestra que pocos han sido los esfuerzos concertados tendientes a reducir la vulnerabilidad de este tipo de viviendas (Alcocer, ICA 2000). El problema tiene facetas más delicadas ya que, para los pobladores de estas zonas, de ingresos muy bajos, su casa es prácticamente todo su patrimonio. Su pobre economía los obliga a que, en caso de colapsos parciales o totales, reconstruyan la vivienda con los mismos materiales de la original, incluso, usando los mismos adobes. Es necesario por ello contar con técnicas de rehabilitación (reparar y/o reforzar) relativamente fáciles de realizar, económicas y de comprobada efectividad.

En el presente Capítulo se describen una serie de técnicas de rehabilitación que ayudan a evitar los daños típicos que se han identificado en el presente trabajo, debidos principalmente a eventos sísmicos. Los distintos tipos de daño estudiados en el Capítulo 5 se han resumido gráficamente en la figura 6.1.

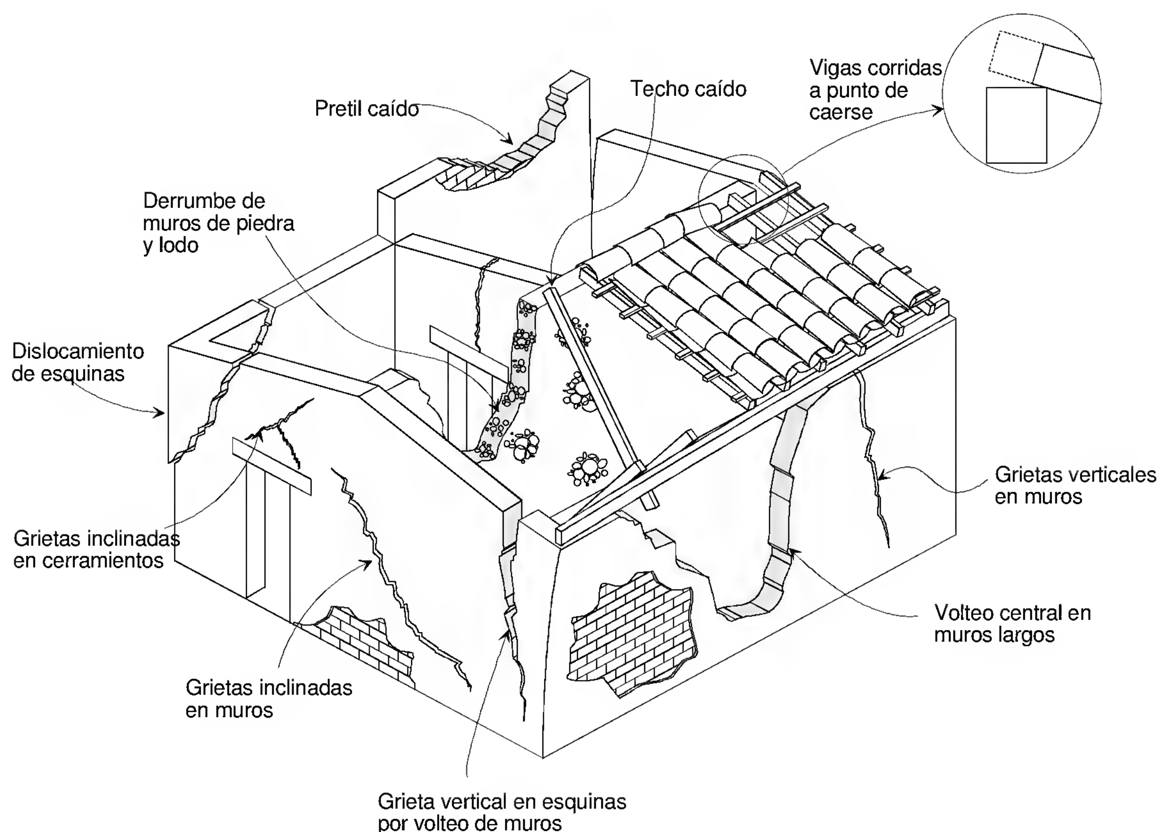


Figura 6.1 Principales tipos de daño identificados en la vivienda de adobe

Entre los principales tipos de daño observado destacan:

1) Agrietamiento y separación de las esquinas.
2) Volteo. El coceo de los techos inclinados, además de las fuerzas de inercia fuera del plano de los muros, pueden provocar esfuerzos de flexión que generan grietas verticales en los extremos de los muros y finalmente su vuelco.
3) Agrietamiento de muros. Los muros de adobe pueden exhibir grietas inclinadas, por tensión diagonal o por cortante.
4) Separación de los sistemas de piso/techo de muros de apoyo, acompañados de la caída de techos.

Las técnicas para remediar estos daños en la vivienda de adobe, se presentan en las secciones que siguen. En el apéndice A, se hace una propuesta de una Cartilla de Refuerzo Básica que reúne las recomendaciones más significativas y cuya elaboración tuvo como objetivo contar con un material gráfico para distribuirse entre la población con el fin de que los trabajos de rehabilitación puedan se ejecutadas por los mismos propietarios de las viviendas (auto construcción).

6.2 UBICACIÓN Y GEOMETRÍA BÁSICA DE LA VIVIENDA

Antes de pasar a las recomendaciones específicas para la reparación o refuerzo de los elementos estructurales de la vivienda es necesario considerar la ubicación de la misma, ya sea en construcciones existentes como en la zona donde se planee levantar una nueva construcción. Si se identifica el lugar como zona de alto riesgo será necesario reubicar la vivienda. Este es el caso de viviendas construidas cerca de barrancas, ubicadas tanto en la parte superior como en la parte baja de laderas que corren el riesgo de fallar. Algunas recomendaciones que se pueden dar para identificar este peligro potencial se pueden revisar a nivel muy simplificado por los usuarios, como por ejemplo alejar la vivienda un mínimo de 2 m de las laderas (ver apéndice B); sin embargo, es necesario la participación de especialistas para identificar amplias zonas de riesgo de deslizamiento de laderas.

El tipo de terreno y la presencia de humedad es muy importante en la ubicación de la zona de construcción, pero de especial importancia será la identificación de zonas de inundación y de evitar la construcción en zonas de cauces de ríos que eventualmente pueden sufrir serias afectaciones debido a lluvis torrenciales. Estos aspectos pueden ser identificados por los pobladores, pero es necesario también la intervención de especialistas. Si bien es posible construir obras para tratar de encausar las aguas en algunos casos, en general la recomendación es no construir en dichas zonas de alto riesgo.

La ubicación en terrenos con humedad constante puede significar daños por hundimientos de partes de las viviendas (asentamientos diferenciales), además de que loa presencia de humedad reduce la resistencia y durabilidad de los adobes.

Para reconocer la dureza del suelo en campo se puede considerar que en suelos blandos entra con facilidad la pala, en suelos duros entra el pico, y en suelos muy duros el pico sólo raya (SAHOP, 1977).

En cuanto a la geometría más adecuada, se debe evitar las salientes o formas como "L" en planta y las formas muy alargadas por lo que se recomienda contar con una forma en planta rectangular donde el lado mayor no exceda de una y media vez la longitud del lado menor (SAHOP, 1977).

6.3 TÉCNICAS DE REPARACIÓN LOCAL

Cuando los muros estén agrietados, será necesario reparar los grietas, rellenándolas con mortero de barro y cal (SAHOP, 1977). De manera similar si algún muro sufre aplastamiento, las piezas dañadas será necesario sustituirlas por nuevas con iguales o mejores características. Esta técnica no mejora las condiciones de vulnerabilidad de la vivienda de adobe, por tanto, para verdaderamente mejorar el comportamiento sísmico de este tipo de construcciones es necesario combinarla con las técnicas de las secciones 6.3 y 6.4.

6.4 CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO Y AMARRE

Si se observan los modos de falla de las estructuras de adobe, un gran número de ellos se pueden evitar si se colocan elementos estructurales de unión que obliguen a los muros a trabajar como una unidad tridimensional. En los puntos que siguen se describen algunos procedimientos que ayudan a lograr este objetivo.

6.4.1 Construcción de Dalas en la Parte Superior

Para garantizar el trabajo en conjunto entre los muros de las viviendas, una opción es construir una dala perimetral de concreto o de madera, que sea continua y que esté debidamente conectada al sistema de piso/techo. En la figura 6.2 se presentan ambas alternativas (tomada de Hernández y otros, 1979). Esta opción tiene el inconveniente de que su construcción requiere retirar el techo.

Algunos autores han recomendado la construcción de dentellones en las esquinas de los muros (SAHOP, 1977, Hernández, 1979) y que se han usado en ensayes experimentales (Alarcón, 1999). Dichos elementos buscan reforzar esta zona crítica y proporcionar un apoyo horizontal para el muro. Alarcón consideró el uso de los dentellones para servir de apoyo al puntal de compresión que se formaría en los muros. Los detalles de conexión de estos elementos deberán garantizar el buen trabajo de la conexión, siguiendo recomendaciones para estructuras de concreto. En la figura 6.2 se muestran esquemas de esta conexión, que en general consiste en rematar las barras con ganchos a 90°, extendiéndose hasta la parte posterior de la conexión.

La saliente inferior en las dalas que se ha presentado en múltiples publicaciones puede tener como dimensiones 100 mm de ancho por 30 mm de altura (SAHOP, 1977), y requiere que se practique una ranura o de la fabricación de piezas especiales de adobe. Algunos autores cuestionan la utilidad de esta saliente pues la resistencia del adobe a los lados de la misma es muy inferior a la del concreto y sería poco lo que contribuiría a restringir el movimiento fuera del plano adicional a la fricción y efectos de confinamiento que de todos modos proporciona una dala con base plana.

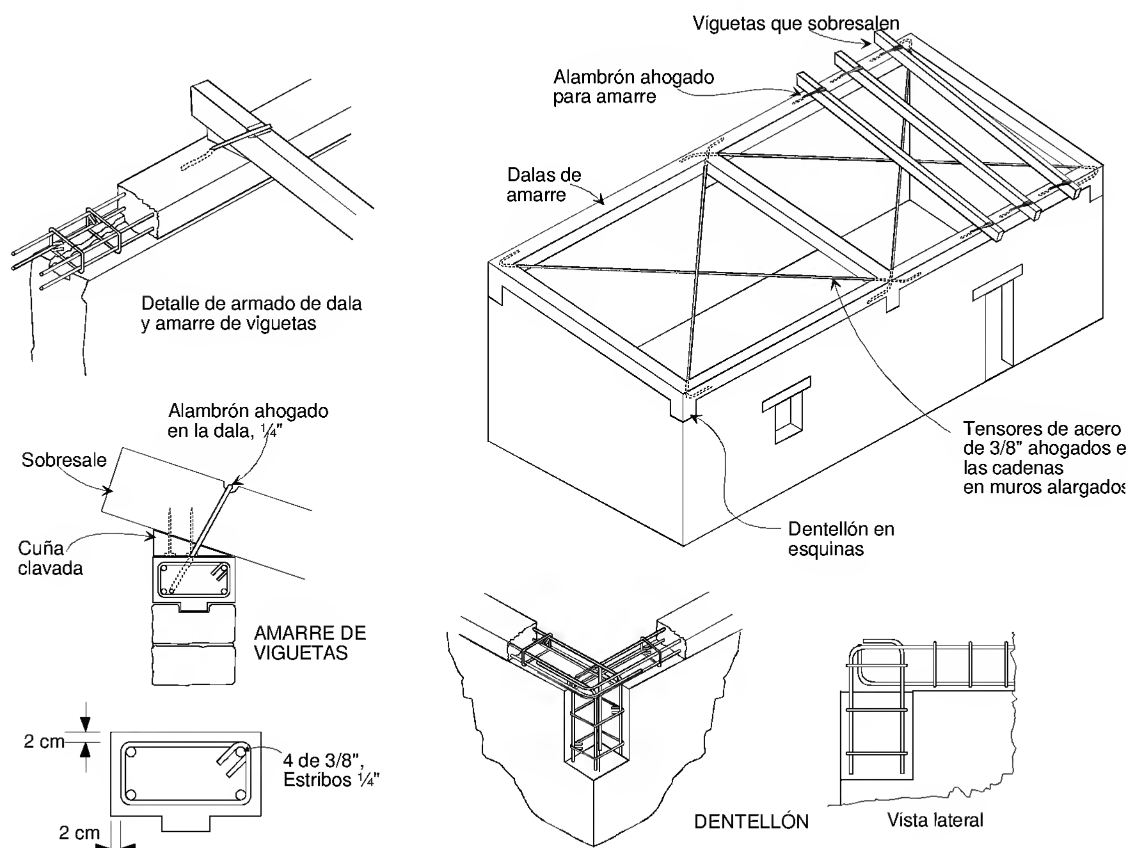


Figura 6.2 Construcción de dalas de cerramiento de concreto reforzado

Para evitar los efectos de volteo central en los muros largos y proporcionar un cierto efecto de diafragma, se recomienda la colocación de tirantes diagonales en el sistema de techo, adecuadamente anclados en las dalas de concreto reforzado. El efecto conjunto de tirantes y puntal da un trabajo de armadura que transmite las fuerzas horizontales a los muros laterales (fig. 6.2).

6.4.2 Construcción de Castillos y Dalas

La construcción de castillos y dalas dentro del espesor de los muros de adobe es una de las técnicas que con frecuencia se usan en nuestro país (fig. 6.3). Esta serie de elementos de concreto reforzado tendrá como función primaria mantener lograr una liga entre los muros. Para su correcto funcionamiento se requiere empotrar los castillos en la cimentación o, en algunos casos, construir cimientos para los nuevos castillos. Será necesario retirar el sistema de piso/techo para construir las dalas. Su desempeño depende de lograr que los nuevos elementos trabajen monolíticamente con los muros de adobe, por lo que algunos autores tradicionalmente han recomendado la construcción de llaves de cortante (fig. 6.4) es decir, bloques salientes de concreto en las dalas para una mejor transmisión del cortante entre estas y las piezas de adobe.

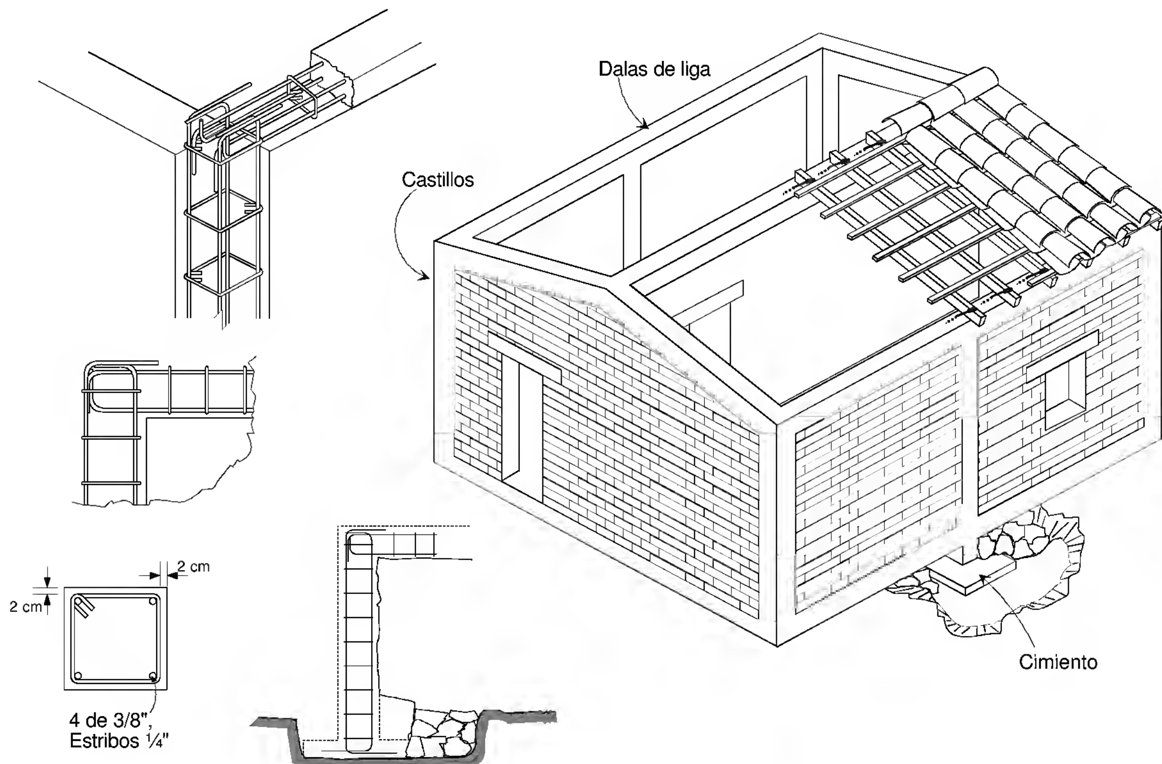


Figura 6.3 Adición de castillos y dalas de concreto reforzado

En lo posible se deberán observar recomendaciones para estructuras de concreto, como lo son los detalles de conexión, longitudes de anclaje y de traslape, así como el recubrimiento de concreto de 20 mm mínimo. Estos detalles se esquematizan en la figura 6.3.



Figura 6.4 Construcción de castillos y dalas de concreto reforzado como refuerzo

6.4.3 Elementos de Amarre de Madera

Esta puede ser una técnica muy útil en zonas rurales de escasos recursos, en especial donde es económicamente difícil aún contar con cemento, malla o varilla para las otras soluciones presentadas aquí. En la fig. 6.5 se muestran algunas soluciones para resolver los amarres de las piezas de madera en las esquinas. Nuevamente el objetivo fundamental de esta técnica es lograr una liga entre los muros transversales. También se puede simular el confinamiento de castillos y dalas mediante el uso de polines de madera (fig. 6.6).

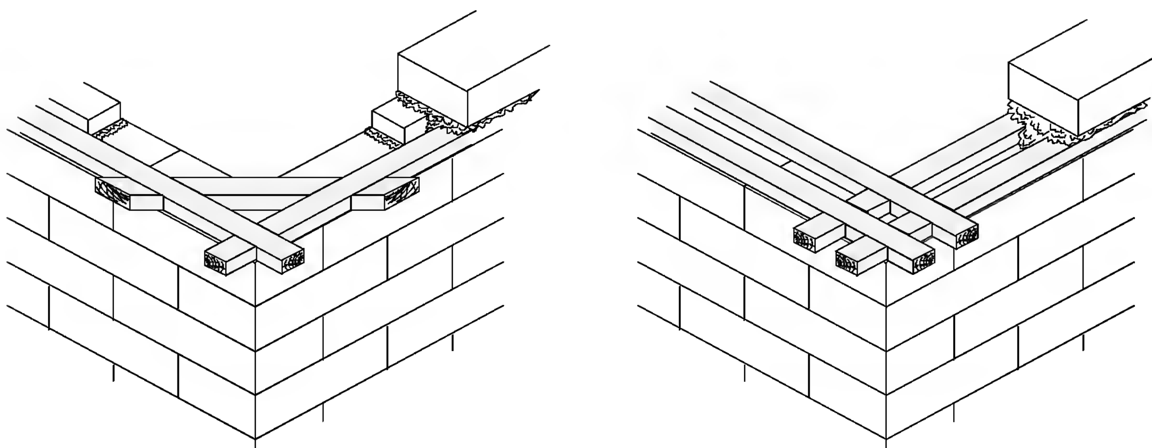


Figura 6.5 Soluciones de amarre con vigas de madera ubicadas en las juntas



Figura 6.6 Vivienda reforzada con polines de madera, que presentó buen comportamiento ante sismos recientes (Tena, 1997)

Las soluciones mostradas en las figuras 6.5 y 6.6 tienen el inconveniente de que la madera sin tratamiento adecuado, se pudre y rompe. Por tal motivo se requiere revisar continuamente que no exista humedad en los muros, en especial las esquinas. La humedad puede provenir del terreno, pero principalmente es importante evitar que filtraciones en los sistemas de techo humedezcan los elementos en la parte superior de los muros. Si se observa deterioro, deberán sustituirse los elementos de madera.

6.4.4 Tensores de Acero

Otra técnica que pretende amarrar los muros entres sí, consiste en colocar tensores horizontales en la parte superior de los muros, u horizontales y verticales.

La aplicación de tensores o tirantes para mantener unidas ciertas partes de estructuras de mampostería, es una práctica antigua; se trata probablemente de la solución más frecuente que se haya adoptado, en el caso de monumentos históricos de mampostería, para remediar signos de debilidad estructural. Su uso se ha estudiado para rehabilitación de edificaciones mampostería de todo tipo, incluyendo el adobe.

Los tensores se alojan en ranuras construidas longitudinalmente en los muros; éstas pueden ser horizontales o verticales según se requiera. Los tensores son, generalmente, alambres o barras de acero con roscas en sus extremos. Estos elementos se tensan en las esquinas mediante tuercas y roldanas que se apoyan en ángulos metálicos debidamente colocados en las esquinas de la construcción (fig. 6.7).

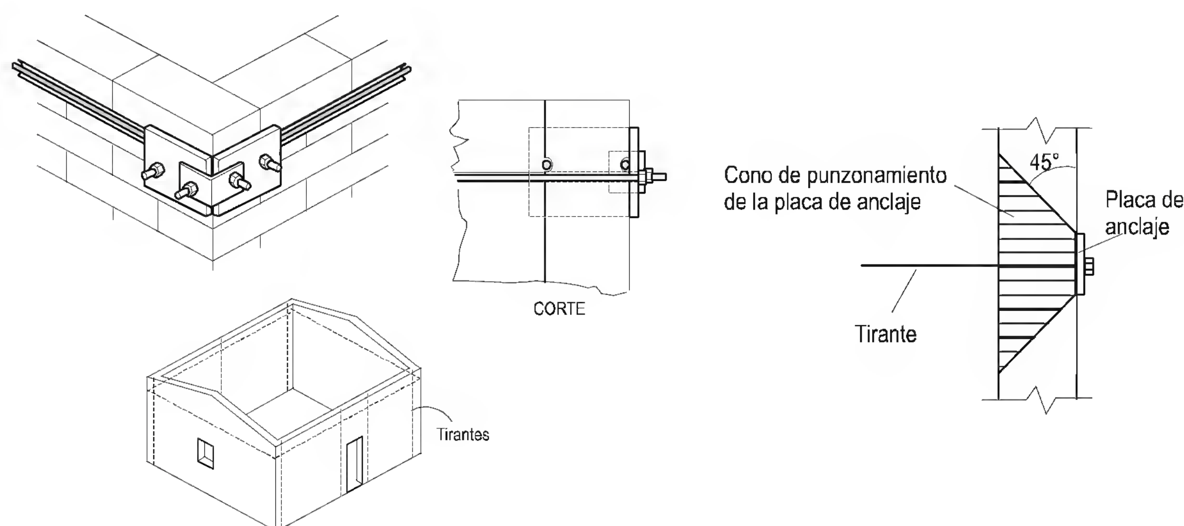


Figura 6.7 Amarre de muros de adobe con tensores metálicos

Los ensayes en mesa vibradora realizados por el Instituto de Ingeniería (Hernández, 1979), demostraron la utilidad del uso de tirantes metálicos como técnica de rehabilitación (ver sección 4.5.2 del Capítulo 4), sin embargo, se demostró que se logra un mejor comportamiento con el uso de malla y mortero.

Como se sabe, el acero con el tiempo sufre relajamiento, razón por la que es necesario revisar el torque (o tensión) de manera periódica. Evidentemente, si el torque es bajo o nulo, los tensores participarán poco o nada en el comportamiento. Sin embargo, no se considera fácil implantar la cultura de mantenimiento del torque entre los habitantes de las comunidades rurales.

6.4.5 Encamisado de Muros con Malla y Mortero

Se ha demostrado que la adición de recubrimientos reforzados, o encamisado, es la técnica de rehabilitación más eficiente. Varios han sido los estudios relacionados con la evaluación de su

contribución a mejorar el comportamiento ante acciones sísmicas (Hernández, 1979; ICA, 1999). Para su construcción se requiere retirar el techo, de modo de emboquillar el extremo superior del muro con mortero para evitar la penetración de agua entre el mortero y el muro.

Se recomienda limpiar la superficie del muro, retirando cualquier tipo de recubrimiento y después humedecerla. Para lograr una mejor liga del mortero, es recomendable practicar ranuras en las juntas horizontales y verticales con una profundidad aproximada de un centímetro (SAHOP, 1977). Posteriormente, se aplica una primera capa de mortero tipo I o II (DDF, 1995) de 1 a 15 mm de espesor; se coloca la malla –de preferencia por ambos lados del muro–, se sujetan con anclajes de acero, y finalmente se coloca la segunda capa de mortero. El recubrimiento debe tener un espesor total de 25 a 30 mm.

La malla puede ser estructural de alambre soldado o malla de gallinero (hexagonal), con las consideraciones discutidas en la sección 4.6 del Capítulo 4. Para el primer caso, es común usar el menor calibre disponible en el mercado, normalmente calibre 10 (3.43 mm de diámetro). Para el segundo, es conveniente usar malla de alambre calibre 20 (diámetro de 0.89 mm) con aberturas de 50 mm. El procedimiento constructivo recomendable se muestra en la figura 6.8.

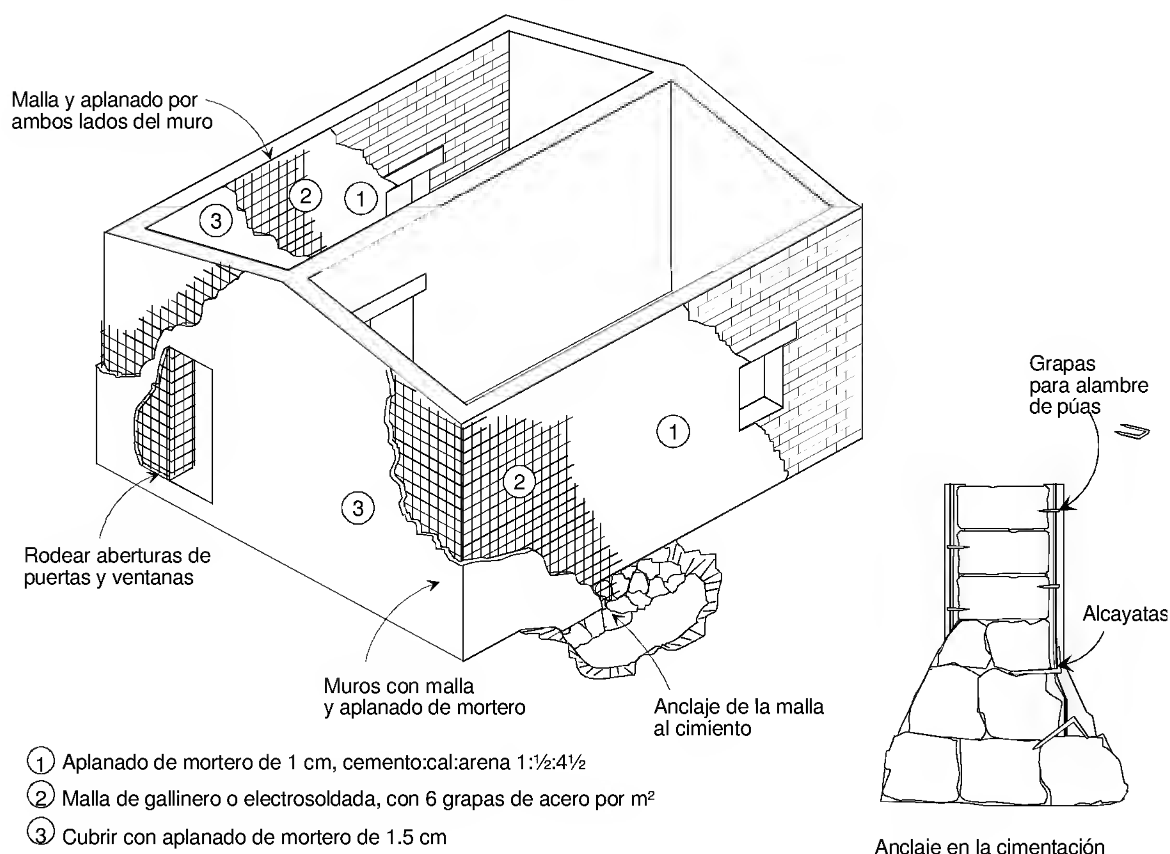


Figura 6.8 Encamisado de muros de adobe con mallas metálicas recubiertas con mortero

La sujeción de las mallas de alambre soldado se hace con barras de acero de 4, 6 u 8 mm de diámetro que atraviesan el espesor del muro, y cuyos extremos son doblados sobre las mallas con ganchos de 90°. Evidentemente, esto obliga a perforar al muro antes de colocar la primera capa de mortero. Se recomienda usar una densidad de anclajes de 4 a 6 por m². Para sujetar mallas de

gallinero, se han usado grapas de 38 mm de longitud colocadas a cada 300 mm. Sin embargo, también este tipo de conector y se ha usado con éxito en los ensayes realizados en el CENAPRED en malla de alambre soldado con densidades de 10 grapas por m² (ver sección 4.6).

Una alternativa al encamisado de todo el muro y que tiene por objeto funcionar como una liga entre los muros y lograr una solución más económica, es la de encamisar únicamente los bordes verticales y horizontales, es decir, las esquinas y la parte superior de los muros, como se muestra en la figura 6.9. En este caso es recomendable usar malla estructural y ser más cuidadosos en el detallado del traslape y conexión de la malla ya que el nivel de los esfuerzos de tensión en las franjas será más elevado.

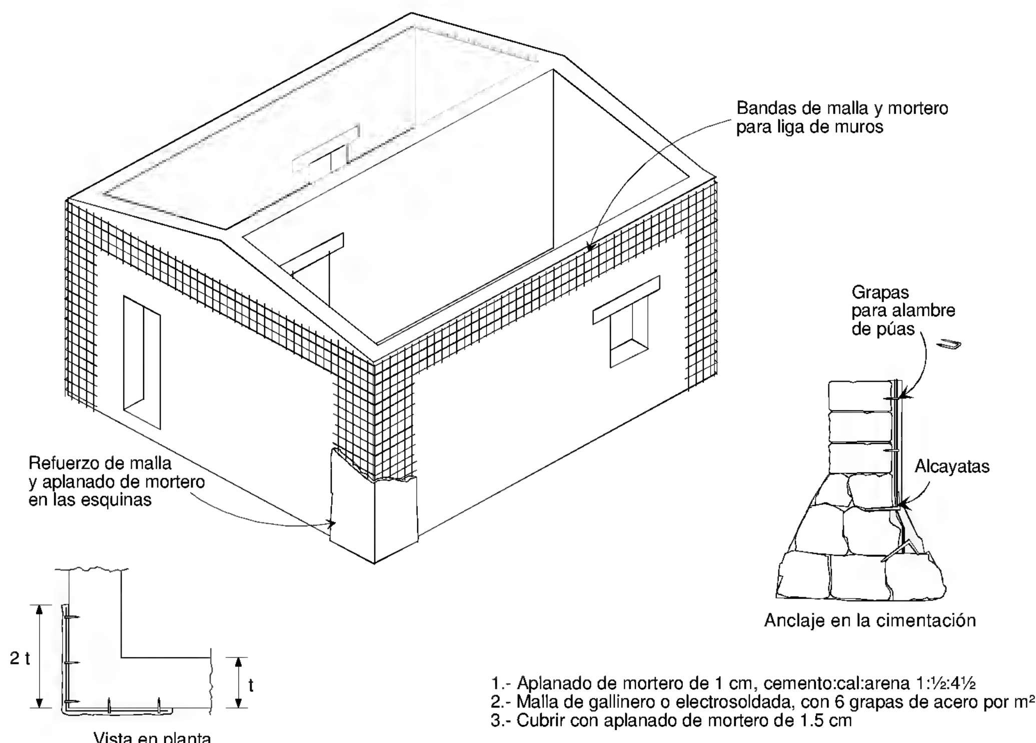


Figura 6.9 Bandas de malla y mortero en las esquinas y la parte superior de muros

Como se ha demostrado en los ensayes de mesa vibradora realizados por Hernández y colaboradores (1979), este método resultó el más eficiente para controlar el daño, y ha sido usado en reforzamiento en zonas rurales afectadas por sismos recientes como se aprecia en la figura 6.10 en donde se usó la técnica en viviendas afectadas por sismos recientes en Oaxaca.



Figura 6.10 Refuerzo de una vivienda de abobe con malla hexagonal y mortero

6.5 VOLTEO CENTRAL EN MUROS LARGOS

Cuando se tienen muro con más de cuatro metros de longitud, es recomendable que además de adoptar alguno de los tipos de refuerzo mencionados en las secciones anteriores, se coloquen tensores diagonales en el techo como lo muestra la figura 6.11 con el objeto de transmitir las fuerzas inerciales de la parte central superior de los muros largos a los muros cabeceros, reemplazando en cierta forma la acción de diafragma rígido con la que no se cuenta debido al tipo de sistema de techo.

Los elementos mostrados en la figura permiten un trabajo tipo armadura en donde la tendencia al desplazamiento de la parte superior central de los muros largos es impedida por los tensores y transmitida a los muros cabeceros. El elemento horizontal central, a modo de puntal y normal a los muros largos, es indispensable para completar el trabajo conjunto como armadura, ya que los tensores se componen de barras de acero de reducido diámetro y gran longitud y, ante una carga de compresión, se pandean y no son efectivos más que ante fuerzas de tensión. De esta forma el puntal central permite el movimiento en conjunto de los dos muros largos, el frontal y el posterior, así como el trabajo de los tensores correspondientes.

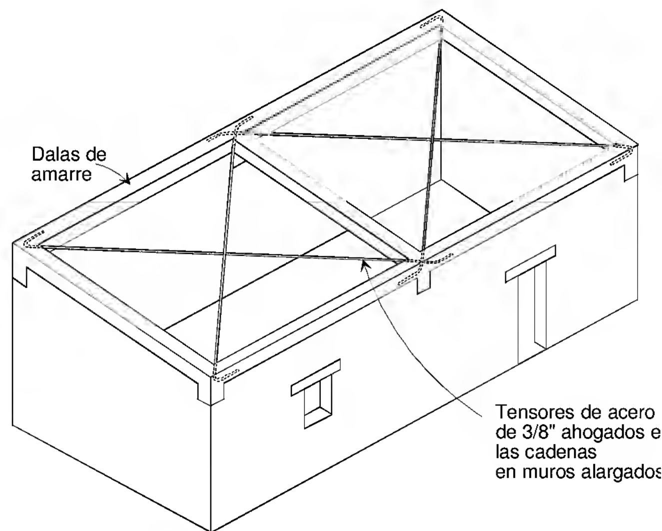


Figura 6.11 Método para evitar el volteo de muros largos

Por último se deberá detallar adecuadamente la conexión de los puntales a los elementos de concreto de manera que puedan desarrollar su resistencia a tensión mediante una longitud de anclaje adecuada, es recomendable proporcionar una longitud de anclaje no menor que 40 veces el diámetro de la barra.

6.6 MODIFICACIONES DE TECHOS

Para evitar los tipos de falla típicos de sistemas de techos se deberá lograr una mejor transmisión de las fuerzas sísmicas del techo hacia los muros, evitar el corrimiento de vigas de madera que pueden provocar la caída del techo y reducir, en lo posible, el uso de sistemas de techo muy pesados como los terrados.

Las tejas de los techos a dos aguas son frágiles y fácilmente se desprenden por los movimientos sísmicos horizontales y verticales; además, son relativamente pesadas, sobretodo cuando están húmedas. Por tanto, cuando sea posible, deben ser reemplazadas por láminas metálicas o de asbesto corrugadas (fig. 6.12). Otra opción para evitar el daño por la caída de las tejas es colocar una malla ligera, tipo malla de gallinero, sobre las vigas de madera antes de la colocación de las tejas.



Figura 6.12 Vivienda de mampostería con techo ligero (ICA, 2000)

Si el sistema de techo es de madera, se puede reforzar bien con tablones clavados perpendicularmente a los existentes o mediante un colado de una losa delgada de concreto reforzado sobre el sistema original. Para este último caso, la malla de acero de la losa de concreto se debe conectar con los muros mediante anclajes. La losa debe conectarse a los muros de preferencia a través de cajas practicadas en los muros y reforzadas con acero anclado en la losa (figura 6.14). Se han observado daños muy severos debido a concentraciones de esfuerzos en construcciones de mampostería con losas de concreto con anclajes inadecuados (ICA, 1999).

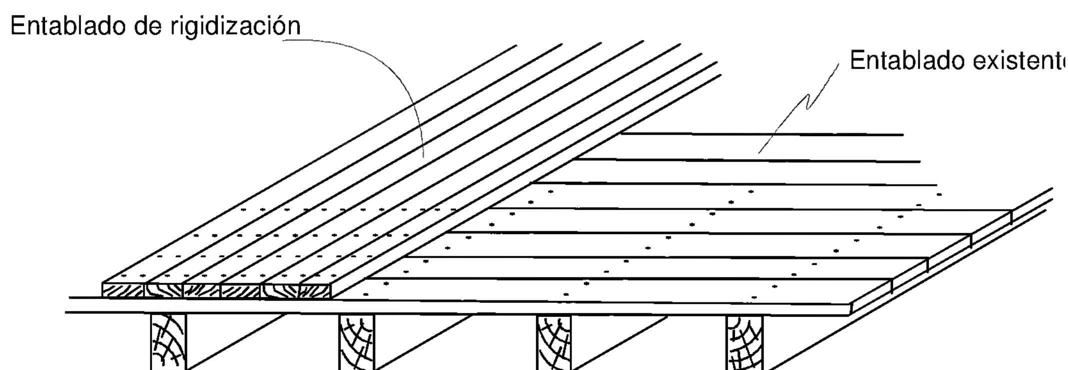


Figura 6.13 Rigidización de un sistema de piso de madera con tablones transversales

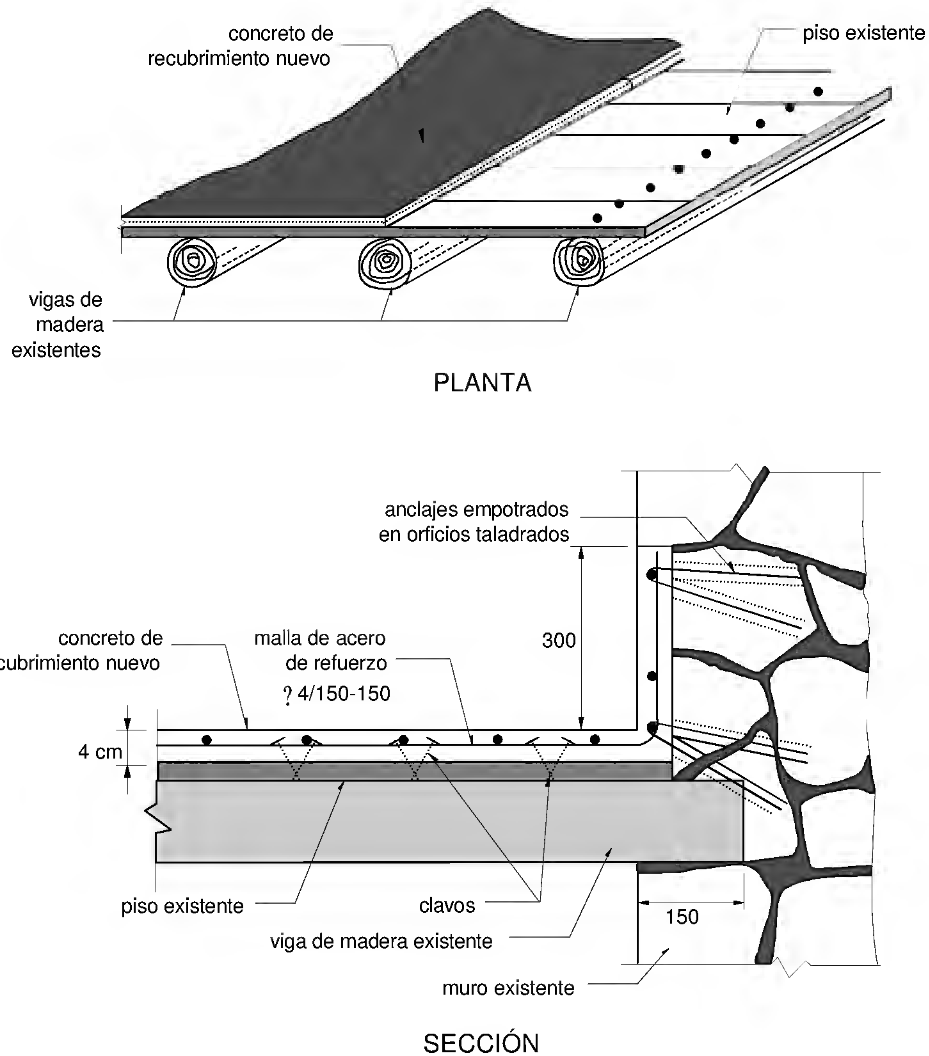


Figura 6.14 Refuerzo de un sistema de piso de madera adicionando una losa de concreto de espesor delgado

En el caso de techos inclinados, es conveniente instalar elementos de amarre que controlen el coceo provocado sobre los muros y amarrar en forma adecuada las vigas de madera a los muros. Dichos elementos evitarán también la caída de techos debido al corrimiento de las vigas de madera. El uso de cuñas triangulares es indispensable para proporcionar un asiento adecuado a las vigas de madera inclinadas sobre la superficie horizontal de otra viga o un muro y evita también el corrimiento de la viga. En la figura 6.15 se presentan algunas soluciones posibles; otras soluciones serán admisibles si logran evitar el deslizamiento de las vigas.

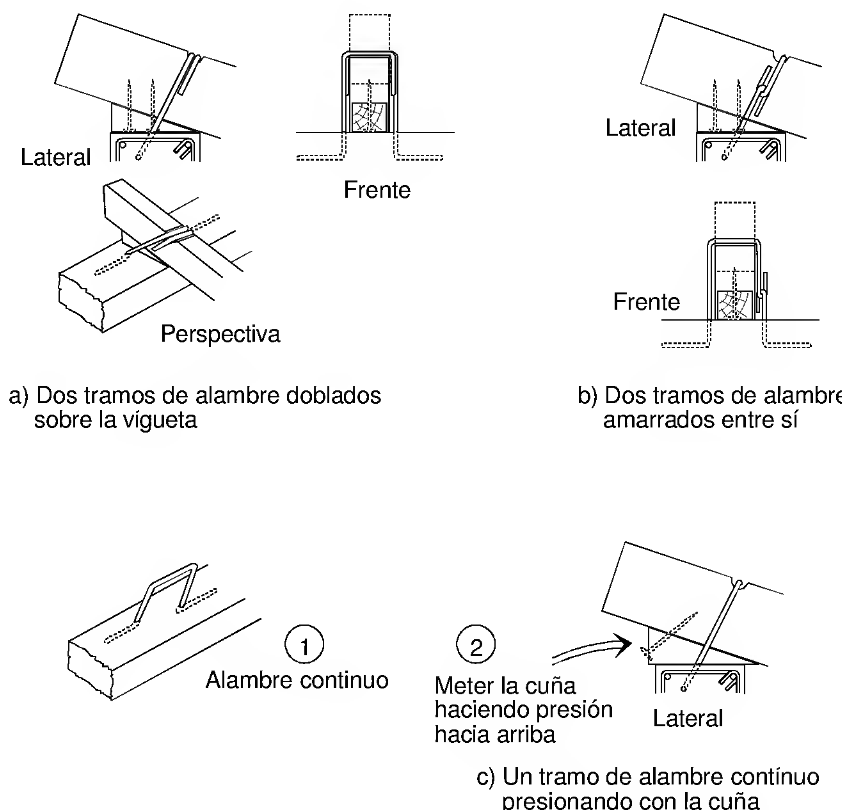


Figura 6.15 Métodos posibles de amarre de vigas de madera

6.7 CIMENTACIÓN

Cuando sea necesario el refuerzo de la cimentación a causa de agrietamientos debidos a asentamientos diferenciales, se recomienda colocar elementos de concreto adosados a la zapata de mampostería y conectados al elemento original (fig. 6.16). Esta acción permitirá aliviar los esfuerzos de contacto del cimiento con el suelo. Asimismo, se recomienda, para evitar la degradación del adobe y de la propia cimentación, la impermeabilización de 500 mm de la base de los muros. En cimentaciones nuevas es necesario elevar la altura del cimiento por lo menos 300 mm arriba del nivel del terreno natural, y existe la opción de colocar piezas de adobe estabilizado en las primeras hiladas.

Es importante también el anclaje de los sistemas de refuerzo a la cimentación, como pueden ser las mallas de alambre ya que los ensayes realizados en el CENAPRED (ver sección 4.6) demostraron que el refuerzo de los muros puede conducir a un cambio en el modo de falla, y así en vez de fallar por cortante se puede producir una falla por deslizamiento o por flexión, lo cual se evitará en buena medida proporcionando un refuerzo íntegro de la estructura y la cimentación.

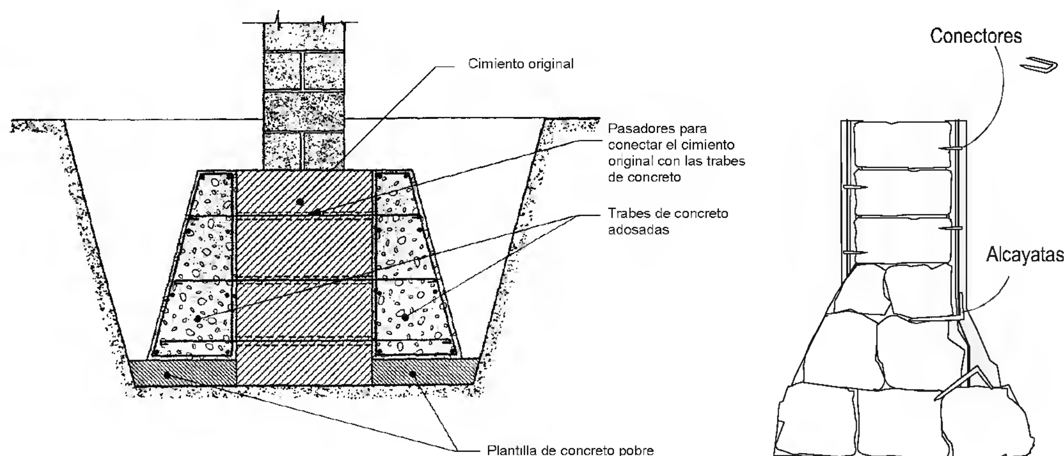


Figura 6.16 ***Ampliación y refuerzo de zapatas continuas y anclaje de malla de alambre en la cimentación***

6.8 RECOMENDACIONES GENERALES

Con base en experiencias previas en diferentes países del mundo, se ha observado que un buen desempeño sísmico de estructuras de adobe se obtiene si se siguen los principios siguientes (ICA, 1999): La relación de esbeltez del muro, altura entre espesor, no debe exceder a ocho (es recomendable que sea seis); la altura de los muros debe ser menor que 3.5 m; y la anchura de una abertura debe ser menor que un tercio de la longitud del muro o que 1.2 m.

Las estructuras con elementos horizontales de confinamiento han exhibido mejores respuestas que aquellos que no los tienen. Independientemente del material con que este hechas, concreto o madera, las dalas deben ser continuas a lo largo de los muros, deben estar conectadas a los techos y ser reforzadas en las esquinas. La continuidad de las dalas se garantiza empalmando la madera o las barras de refuerzo, según el caso. Si son de madera, se recomienda usar elementos de 50? 100 mm como mínimo, que pasen sobre las aberturas y que estén reforzadas en las esquinas con elementos transversales clavados. Resulta conveniente resaltar la mejor resistencia al intemperismo del concreto bien fabricado, que la de la madera.

Si recordamos que las fuerzas inducidas por los sismos en los muros son producto de la masa de inercia y la aceleración, aquéllas se reducirán si se disminuye la masa. Esta última se puede reducir si se evitan techos pesados, generalmente de tejas de barro, y se sustituyen por techos más ligeros, como son los de lámina. Otro aspecto que es importante considerar para la construcción es que el techo sea rígido en el plano. Con esto se pretende asegurar una distribución uniforme de las fuerzas de inercia entre los muros en dirección de carga. De otro modo, existirán concentraciones excesivas, así como empujes sobre los muros perpendiculares, que se traducirán en colapsos prematuros, tanto parciales como totales.

6.9 COMENTARIOS FINALES

Se han presentado una serie de recomendaciones tendientes a mejorar el desempeño sísmico de la vivienda rural, con base en ellas se elaboró un material gráfico con la información básica para que los propietarios de las viviendas puedan llevar a cabo el refuerzo de sus viviendas. Este material

puede servir para la elaboración de una cartilla más completa sobre la construcción y la rehabilitación de la vivienda de adobe. Este material se presenta en el Apéndice A.

APÉNDICE A

CARTILLA DE REHABILITACIÓN, CENAPRED

De los estudios revisados en este documento se elaboró un material gráfico a modo de una cartilla muy básica, pero que reúne las recomendaciones más importantes para la rehabilitación de la vivienda de adobe. Como resultado de la versión preliminar del presente informe se difundió dicho material en la Primera Jornada Nacional de Simulacros para la Prevención de Riesgos (SG, 2000) y se incluye en esta sección como apéndice.

PRIMERA JORNADA NACIONAL DE SIMULACROS PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS



MÉTODOS DE REFUERZO PARA LA VIVIENDA RURAL DE AUTOCONSTRUCCIÓN







Un sismo provoca daños

En el siglo XX ocurrieron en México 100 sismos mayores de 6.5 grados Richter, provocando un impacto significativo por los daños generados. En los últimos 20 años han ocasionado pérdidas por 4 mil 600 millones de dólares y miles de vidas humanas.

Sólo en 1999, los sismos del 15 de julio y del 30 de septiembre ocasionaron 55 muertos, 485 lesionados, 50,390 viviendas dañadas, 3,443 escuelas, 92 hospitales, 2,054 edificios públicos y 53 km de carreteras y puentes federales.

Zonas vulnerables a los sismos

Si bien todo el territorio del país es susceptible a ser afectado por sismos de diversa intensidad, se considera que 2,090 municipios son vulnerables en mayor medida a estos fenómenos naturales. De estos, 363 se clasifican como de muy alto riesgo y 632 como de alto riesgo.

Estos municipios tienen una extensión de más de 540 mil km², que representa el 27% del territorio nacional y en el cual viven cerca de 31 millones de habitantes, un tercio de la población total.

¿Por qué tomar medidas preventivas ante la posibilidad de un sismo?

Gran parte de la costa del estado de Guerrero se encuentra ubicada en la zona de subducción entre las placas de Cocos y Norteamérica, que no ha liberado energía en varias décadas. Por ello, puede presentarse un evento sísmico con el epicentro muy cercano a las ciudades de Acapulco, Chilpancingo y varias regiones aledañas densamente pobladas.

Los tipos de suelos, las importantes aceleraciones sísmicas detectadas y predichas para Chilpancingo, así como la alta vulnerabilidad de sus construcciones, implican la necesidad de tomar medidas preventivas en el corto plazo, a fin de evitar al máximo un escenario de desastre importante.

Además, el alto índice demográfico y el consecuente crecimiento urbano que la ciudad ha experimentado, justifican la gran necesidad de verificar el nivel de vulnerabilidad sísmica de las construcciones, principalmente las ubicadas en las unidades habitacionales de la zona sur del país, las cuales se encuentran asentadas sobre depósitos aluviales blandos.

Las casas de adobe o mampostería, las más vulnerables a un sismo

Un sismo de alta intensidad puede presentar daños significativos en las construcciones populares de mampostería, que se encuentran desplantadas en las regiones cercanas al epicentro, ya que este tipo de estructuras presentan una elevada rigidez y, por consiguiente, un comportamiento deficiente a la acción de las ondas sísmicas de periodo natural corto.

Es importante recordar que, una vez que la construcción de mampostería es dañada, ésta pierde, en gran parte, su capacidad para disipar la energía que el sismo le transmite. Además, si su reparación no se efectúa adecuadamente, se tendrá un alto grado de vulnerabilidad ante la ocurrencia de un evento posterior.

Estudios para el reforzamiento de las construcciones de mampostería o adobe

Ante este panorama, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), han elaborado diversos estudios sobre el comportamiento de los muros de mampostería, cuyo objetivo básico ha sido proponer alternativas para incrementar su resistencia y ductibilidad.

Una síntesis de estos trabajos se presenta a continuación en forma sencilla y gráfica, con el fin de que pueda ser difundida e instrumentada en cada una de las comunidades del país.

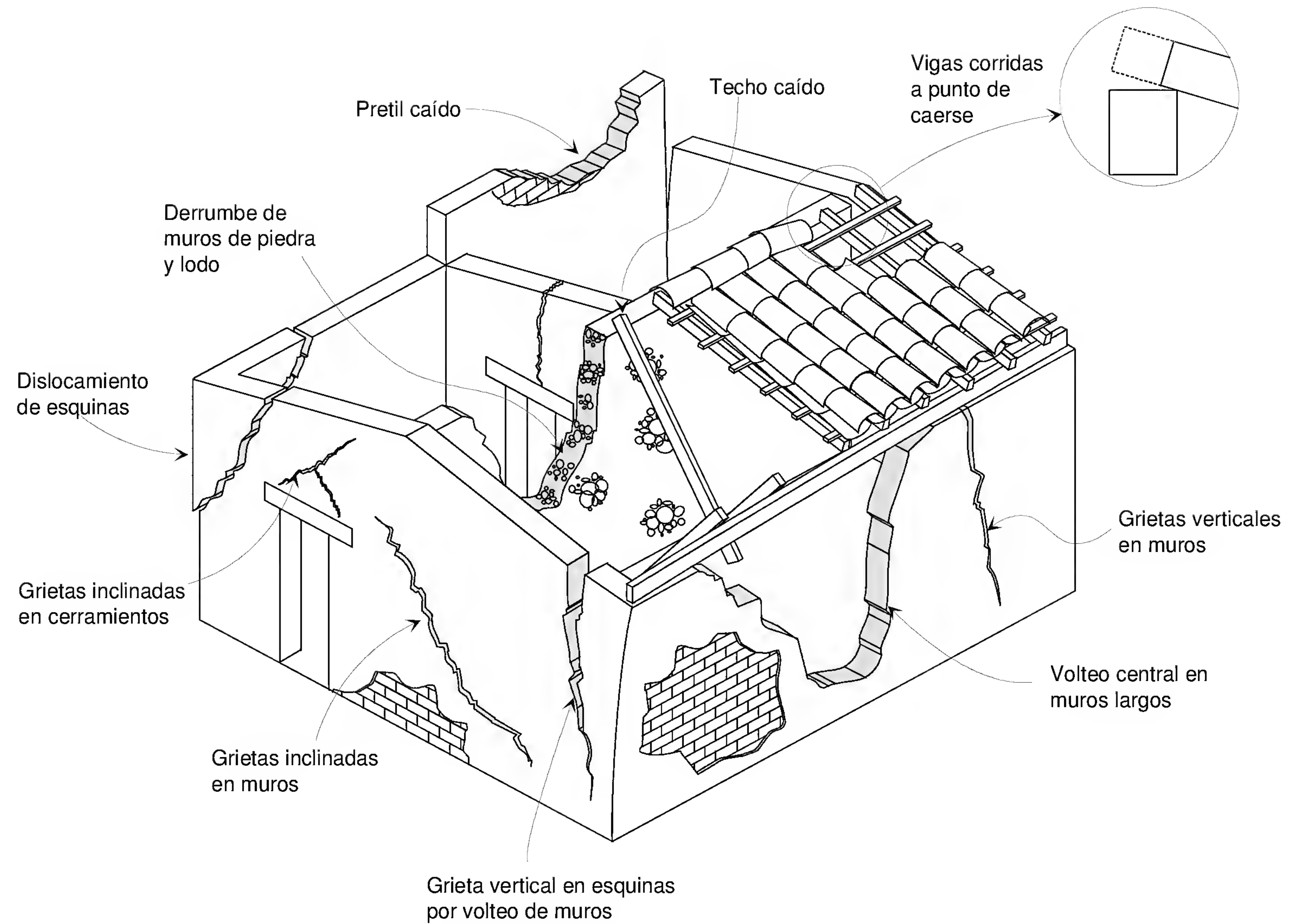


Figura A.1 Daños comunes en vivienda rural de adobe

Refuezo con malla y mortero

Esta técnica consiste en colocar un sistema de refuerzo con malla y mortero. Se recomienda colocar primeramente un aplanado de mortero, después de que éste fragüe y seque por tres días, se coloca una malla de gallinero o bien una malla electrosoldada, fijándola con grapas de acero para alambre de púas. Finalmente, la malla se cubre nuevamente con un aplanado de mortero. Las aberturas de puertas y ventanas deben ser rodeadas por la malla y el aplanado. La malla debe anclarse a la cimentación. La figura A.2 muestra gráficamente el procedimiento.

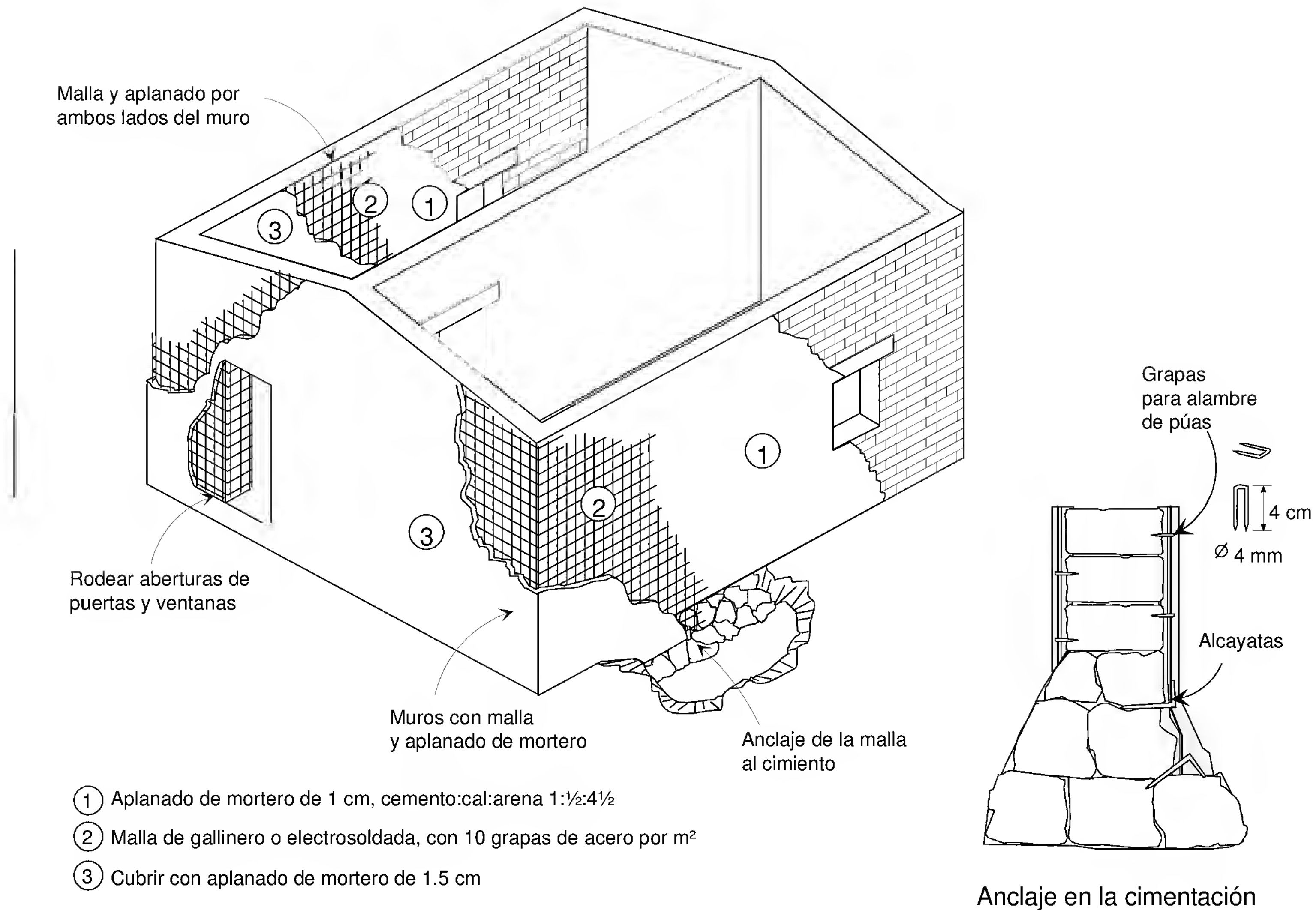


Figura A.2 Refuerzo con malla y mortero

Refuerzo con castillos y dalas

El método consiste en colocar castillos en las esquinas y en zonas intermedias de muros largos, así como dalas en la base y parte superior de los muros. Si no se puede colocar la dala inferior, cuando menos se debe construir la dala superior. Es necesario que los castillos tengan un cimiento propio y que en las uniones entre dalas y castillos, el acero de refuerzo sea cuidadosamente anclado. Estos aspectos se muestran en la figura A.3.

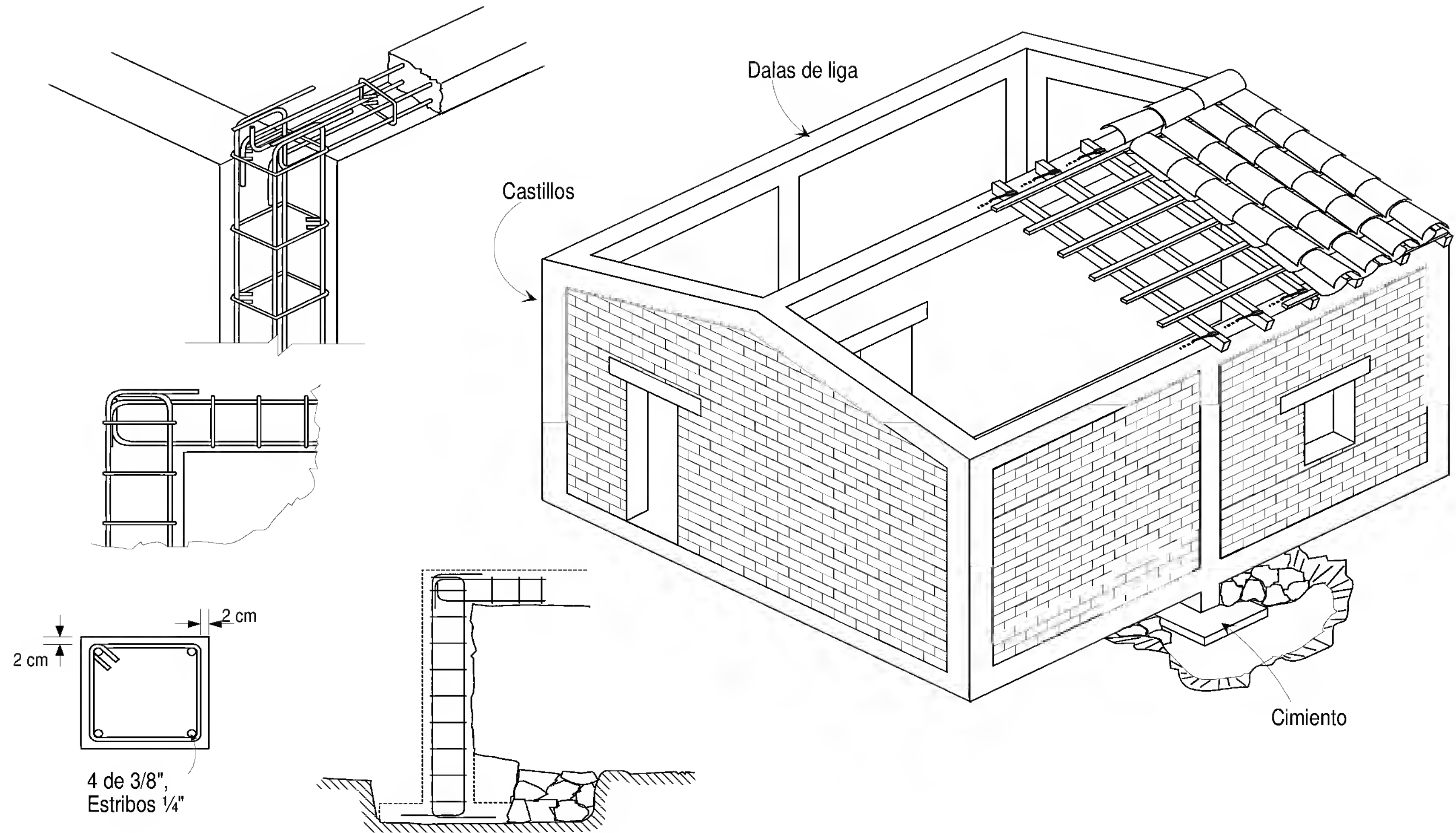


Figura A.3 Refuerzo de una vivienda de autoconstrucción colocando elementos de liga como castillos y dalas

Refuerzo con bandas de malla y mortero

Esta es una variable de la técnica de malla y mortero. Consiste en colocar bandas de malla y mortero en las esquinas y en la parte superior de los muros. Con ello se logra una liga entre los muros y se evitan las grietas en las esquinas que pueden causar el derrumbe de la vivienda. El procedimiento de construcción es el mismo que la técnica de malla y mortero. En la figura A.4 se muestra esta técnica.

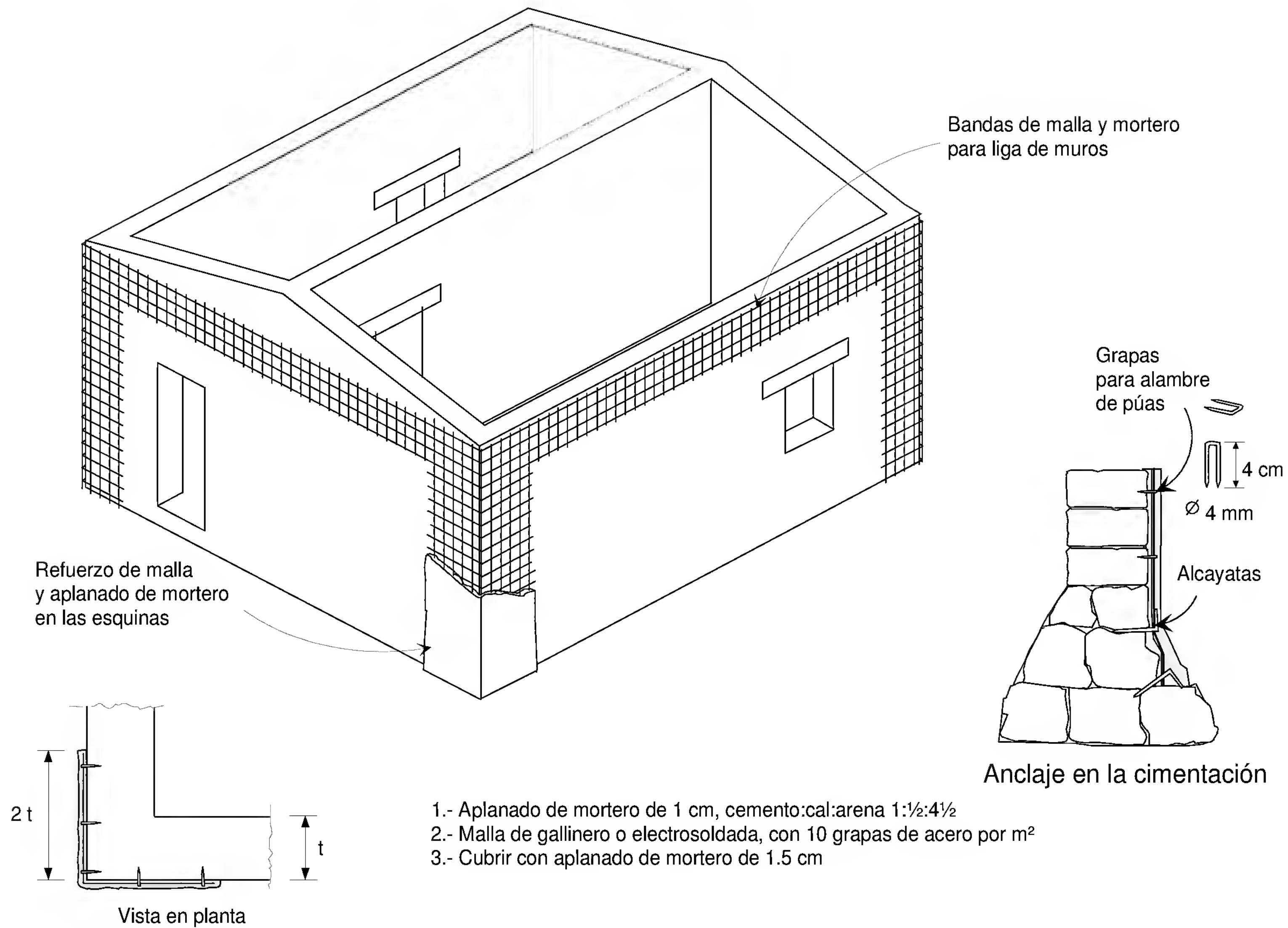


Figura A.4 Refuerzo con bandas de malla y mortero

Refuerzo con dalas de amarre y mejora del sistema de techo

En este método se coloca una dala de amarre con dentellones en la parte superior, así como una serie de tensores de acero que le dan estabilidad al sistema de techo y a los mismos muros. Es importante lograr un sistema de amarre adecuado entre las dalas y los dentellones, así como entre los tensores de acero y las dalas. Asimismo, para evitar la caída de los techos, se requiere que éstos estén ligados a la dala de amarre. La figura A.5 muestra los detalles de esta técnica y la figura A.6 detalles específicos de la forma de lograr un buen amarre entre el sistema de techo y las dalas.

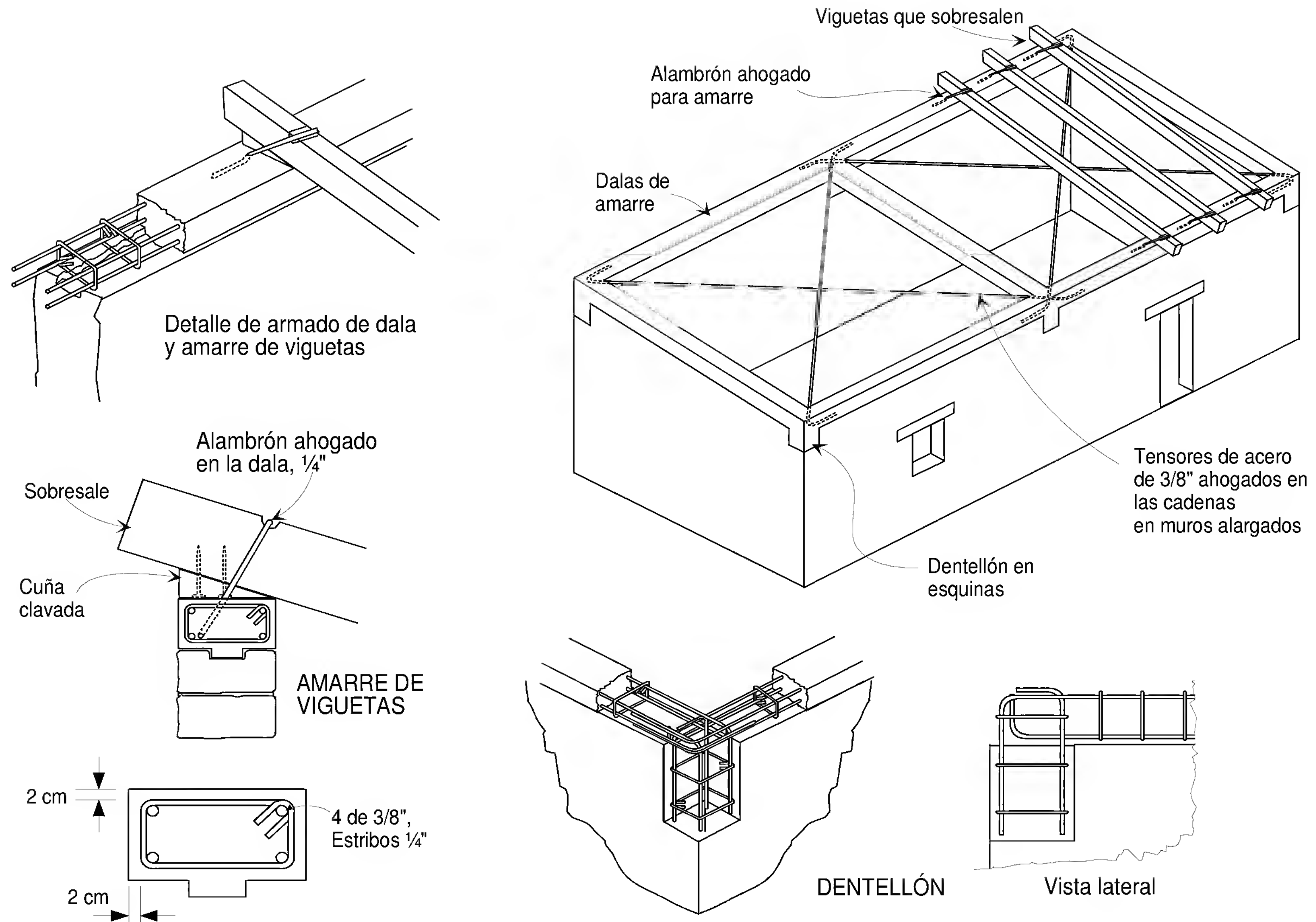
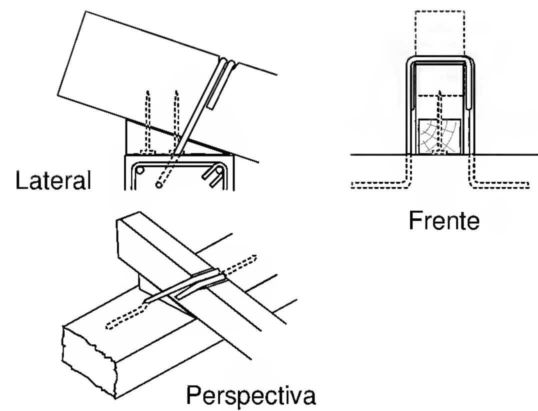
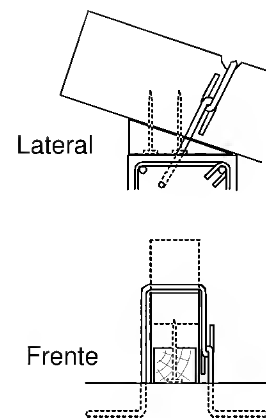


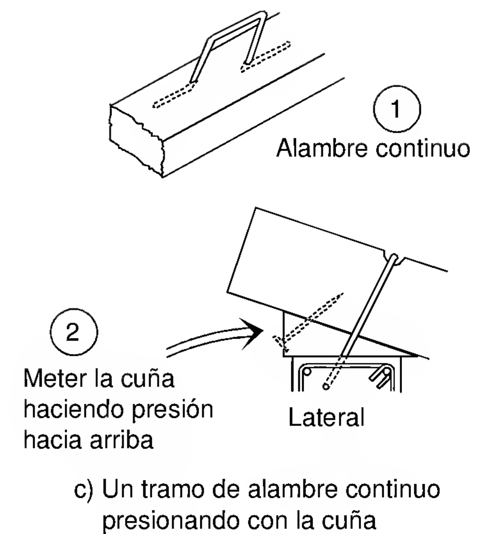
Figura A.5 Dalas de amarre y mejora del sistema de techo



a) Dos tramos de alambre doblados sobre la vigueta

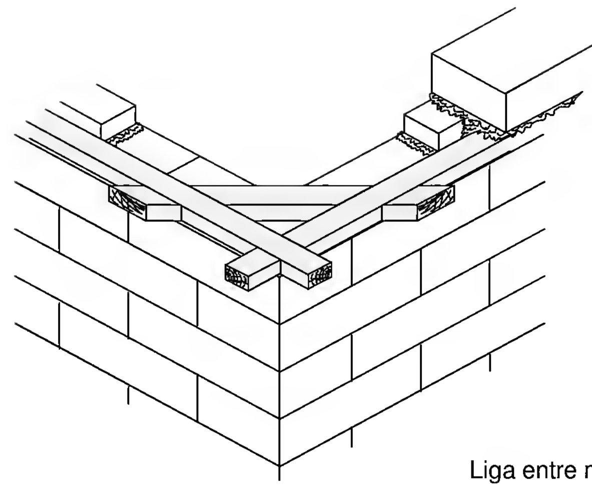


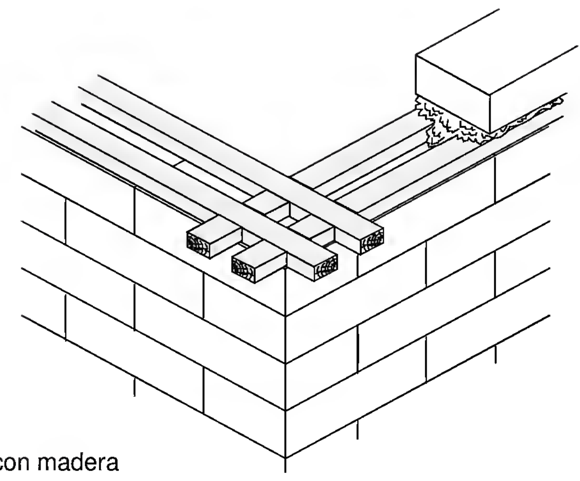
b) Dos tramos de alambre, amarrados entre sí



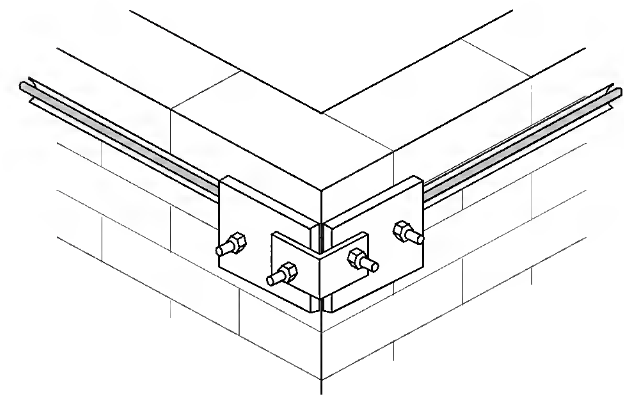
c) Un tramo de alambre continuo presionando con la cuña

Figura A.6 Detalles posibles de amarre de vigas de techo

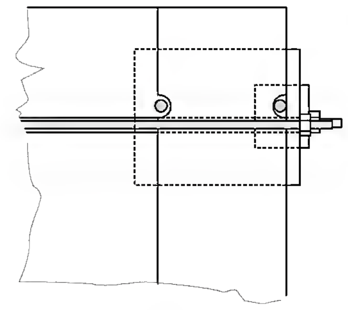




Liga entre muros con madera



Refuerzo con tirantes y placas



CORTE

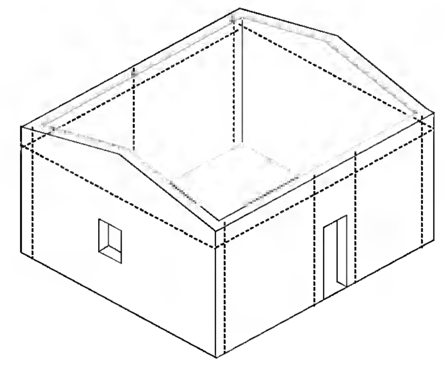
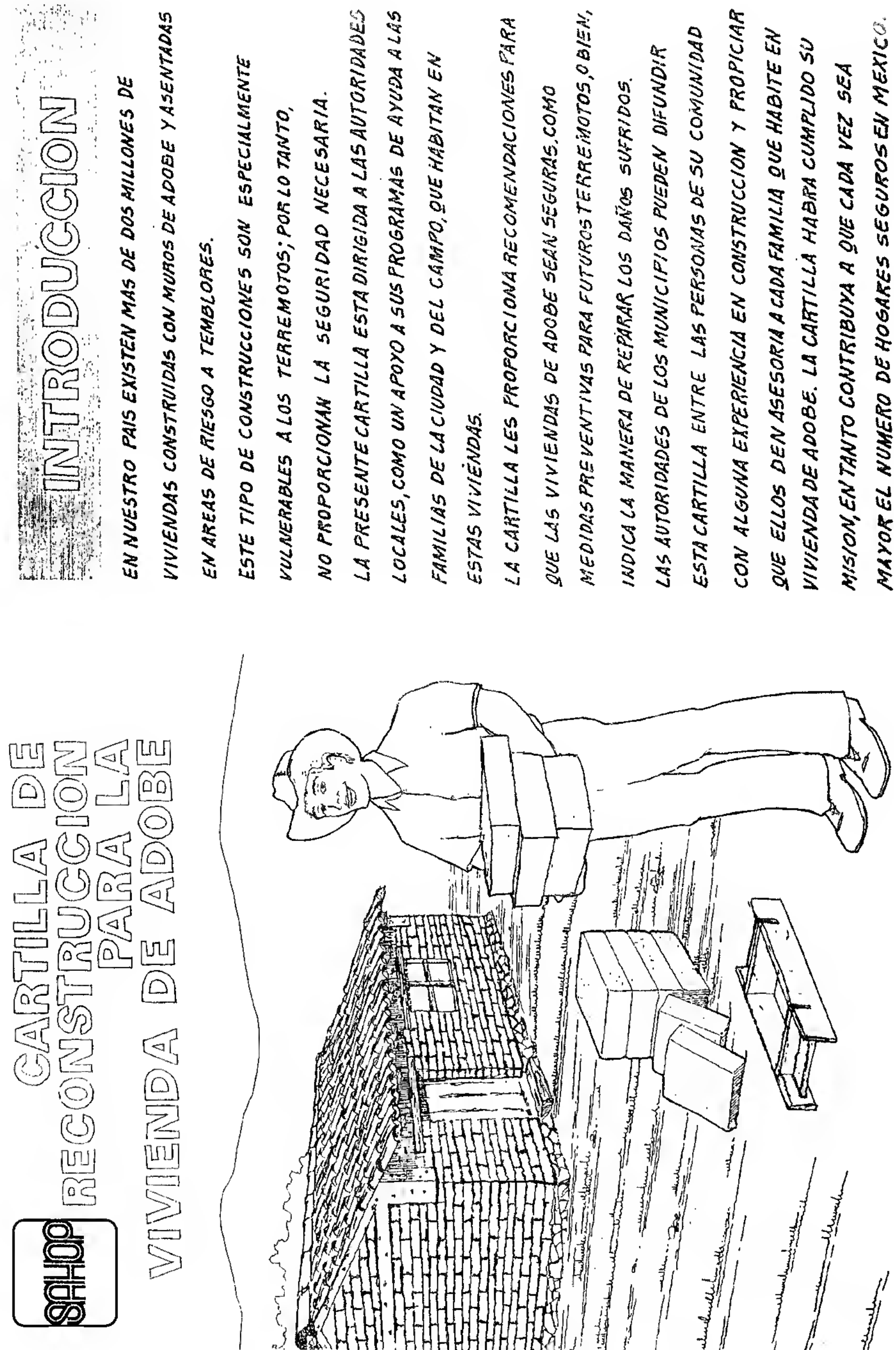


Figura A.7 Otras soluciones de amarre de muros

APÉNDICE B

CARTILLA DE REHABILITACIÓN, SAHOP

En este apéndice se muestra parte del material de una cartilla de reconstrucción para la vivienda de adobe preparada por la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP, 1977). El objetivo de incluir parte de esta cartilla aquí es difundir este magnífico material, y mostrar que desde hace casi 25 años ha existido información para la rehabilitación.



INTRODUCCION

EN NUESTRO PAIS EXISTEN MAS DE DOS MILLONES DE VIVIENDAS CONSTRUIDAS CON MUROS DE ADOBE Y ASENTADAS EN AREAS DE RIESGO A TEMBLORES.

ESTE TIPO DE CONSTRUCCIONES SON ESPECIALMENTE VULNERABLES A LOS TERREMOTOS; POR LO TANTO, NO PROPORCIONAN LA SEGURIDAD NECESARIA.

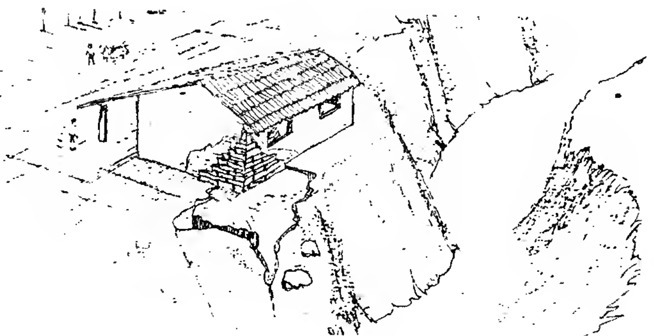
LA PRESENTE CARTILLA ESTA DIRIGIDA A LAS AUTORIDADES LOCALES, COMO UN APOYO A SUS PROGRAMAS DE AYUDA A LAS FAMILIAS DE LA CIUDAD Y DEL CAMPO, QUE HABITAN EN ESTAS VIVIENDAS.

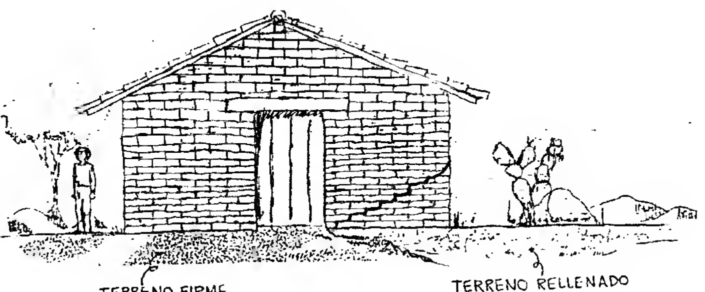
LA CARTILLA LES PROPORCIONA RECOMENDACIONES PARA QUE LAS VIVIENDAS DE ADOBE SEAN SEGURAS, COMO MEDIDAS PREVENTIVAS PARA FUTUROS TERREMOTOS, O BIEN, INDICA LA MANERA DE REPARAR LOS DAÑOS SUFRIDOS.

LAS AUTORIDADES DE LOS MUNICIPIOS PUEDEN DIFUNDIR ESTA CARTILLA ENTRE LAS PERSONAS DE SU COMUNIDAD CON ALGUNA EXPERIENCIA EN CONSTRUCCION Y PROPICIAR QUE ELLOS DEN ASESORIA A CADA FAMILIA QUE HABITE EN VIVIENDA DE ADOBE. LA CARTILLA HABRA CUMPLIDO SU MISION, EN TANTO CONTRIBUYA A QUE CADA VEZ SEA MAYOR EL NUMERO DE HOGARES SEGUROS EN MEXICO.

SAHOP

CARTILLA DE RECONSTRUCCION PARA LA VIVIENDA DE ADOBE

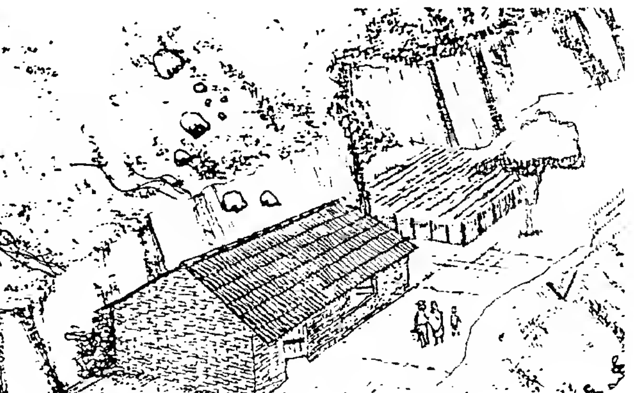




MUY CERCA DE UNA LADERA.

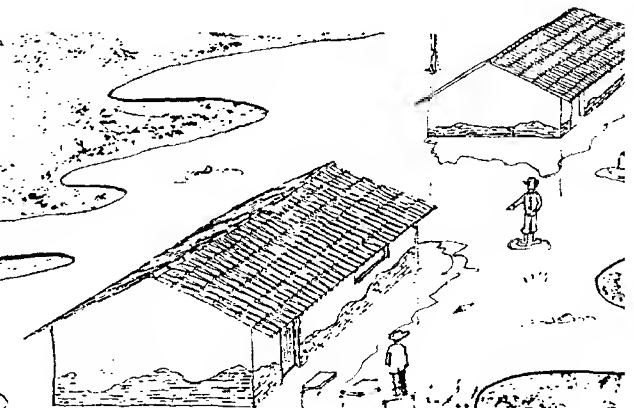
¡CUIDADO!

LO QUE RUEDE POR
LA LADERA
PUEDE HASTA
DESTRUIR
TU CASA.



SOBRE PARTES HUMEDAS.

PUESTO
QUE EL TERRENO
PUEDE
HUNDIRSE
CON FACILIDAD O
DESNIVELARSE,
ADEMAS DE QUE
LA HUMEDAD
DAÑA AL ADOBE.

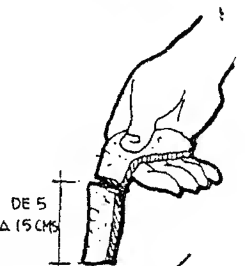


ES IMPORTANTE RECORDAR QUE LA TIERRA NEGRA O DE CULTIVOS NO ES BUENA PARA HACER ADOBES, PERO...



¿ COMO SE CONOCE CUANDO LA TIERRA ES BUENA PARA HACER ADOBES ?

1: FORMA UN ROLLO O CHORIZO DE BARRO CON POCA AGUA (NO DEBE PEGARSE A LAS MANOS).



2: APLANALO PARA HACER UNA CINTA DELGADA, TAN LARGA COMO SE PUEDA.

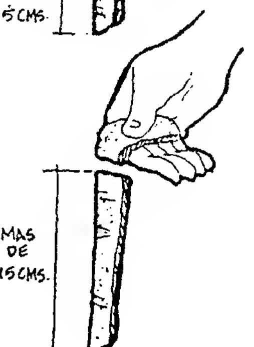
3: OBSERVA EL LARGO QUE PUEDE ALCANZAR LA CINTA SIN ROMPERSE.



SI LA CINTA SE ROMPE ENTRE LOS 5 Y LOS 15 CMS.:
LA TIERRA ES BUENA PARA HACER ADOBES.

SI LA CINTA SE ROMPE ANTES DE LOS 5 CMS.:
SE PONE MAS ARCILLA.

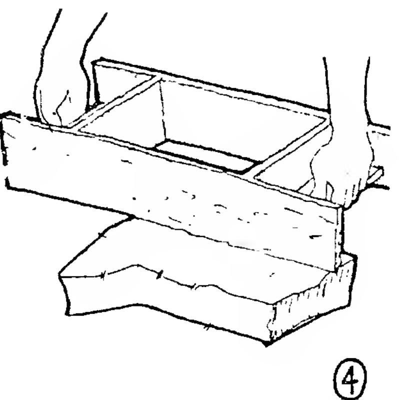
SI LA CINTA SE ROMPE DESPUES DE LOS 15 CMS.:
SE PONE MAS ARENA

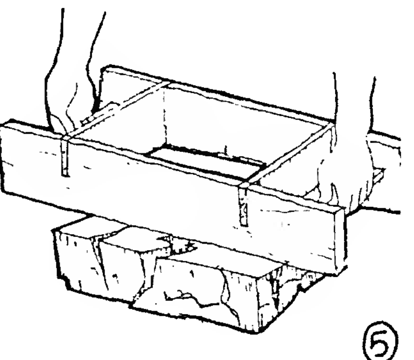


4.- SI AL RETIRARLO SE DEFORMA EL ADOBE ES PORQUE EL BARRO TIENE MUCHA AGUA.

5.- SI EL ADOBE SE RAJA O SE QUIEBRA, ES PORQUE EL BARRO ESTA MUY SECO.

6.- PARA EVITAR QUE EL ADOBE SE PEGUE AL MOLDE,
LIMPIALO CON UN TRAPO HUMEDO Y ESPOLVOREA ARENA ANTES DE VACIARLO.

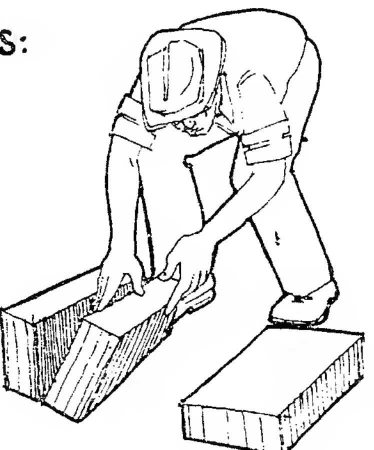




PARA SECAR LOS ADOBES:

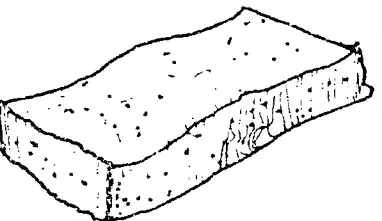
A LOS 3 DIAS SE PARAN LOS ADOBES PARA QUE SE SEQUEN MAS RAPIDO.

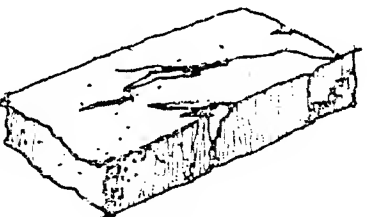




A LA 3 SEMANAS YA SE PUEDEN CARGAR Y APILAR.

IMPORTANTE:



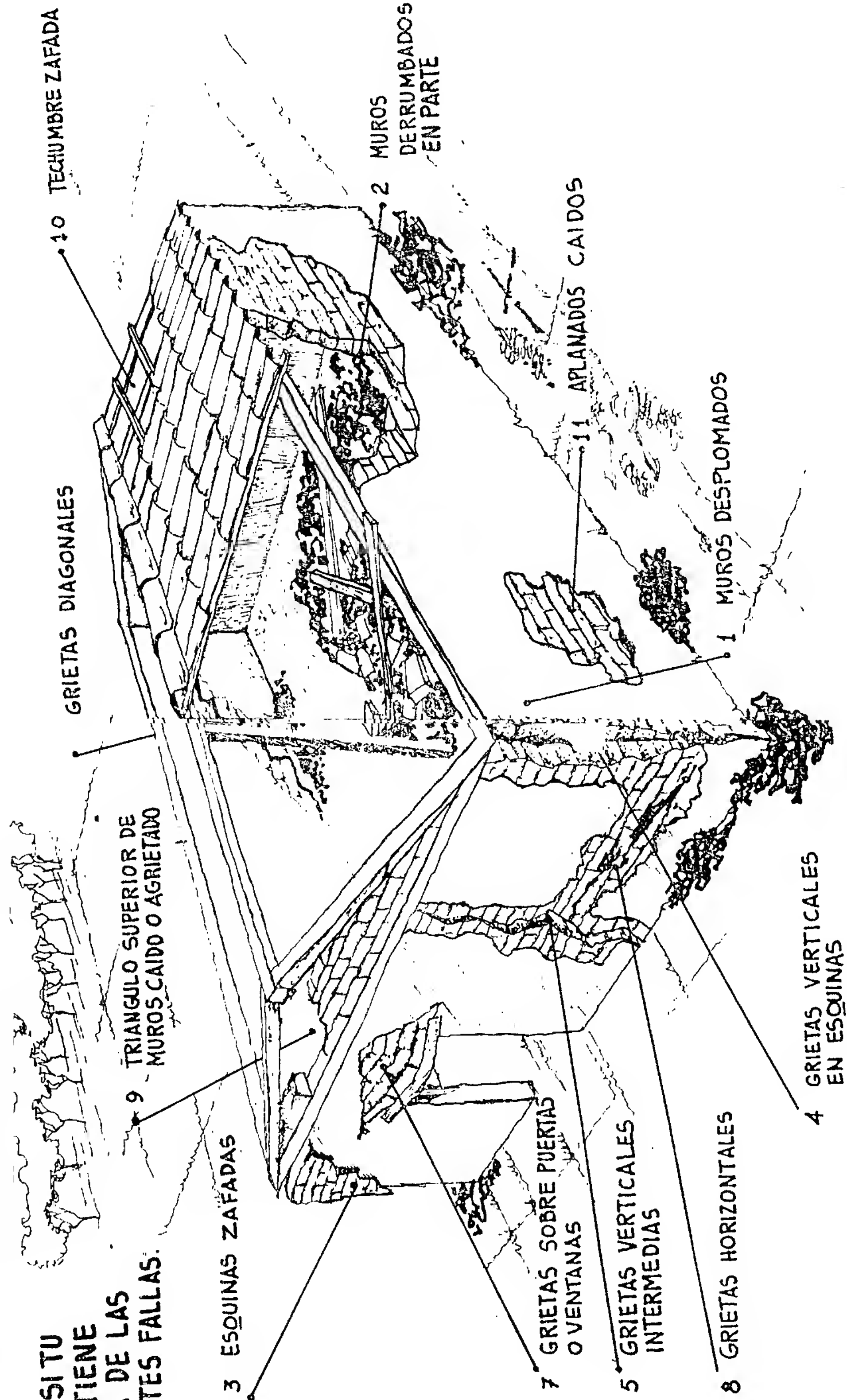


SI A LAS 4 SEMANAS EL ADOBE DE PRUEBA TIENE GRIETAS O DEFORMACIONES, AGREGA AL BARRO ARENA O PAJA.

SI A LAS 4 SEMANAS EL ADOBE DE PRUEBA NO RESISTE EL PESO DE UN HOMBRE, DEBE AÑADIRSE ARCILLA AL BARRO.



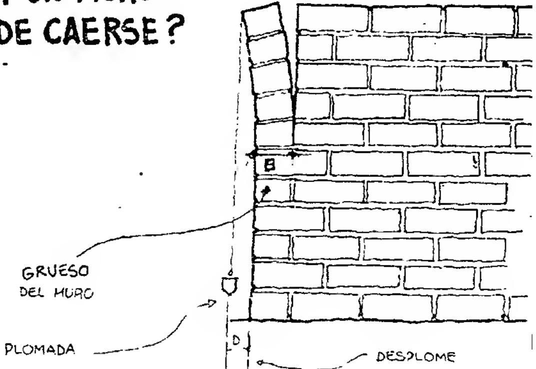
SI LO RESISTE, ESTE ADOBE ES BUENO PARA CONSTRUIR TU CASA


A. IDENTIFICA LAS FALLAS
REVISA SI TU CASA TIENE ALGUNA DE LAS SIGUIENTES FALLAS:
3 ESQUINAS ZAFADAS
9 TRIANGULO SUPERIOR DE MUROS CAIDO O AGRIETADO
GRIETAS DIAGONALES
10 TECHUMBRE ZAFADA
2 MUROS DERRUMBADOS EN PARTE
11 APLANADOS CAIDOS
1 MUROS DESPLOMADOS
4 GRIETAS VERTICALES EN ESQUINAS
8 GRIETAS HORIZONTALES
5 GRIETAS VERTICALES INTERMEDIAS
7 GRIETAS SOBRE PUERTAS O VENTANAS

B REPARACION DE MUROS DESPLOMADOS

¿COMO SABER SI UN MURO TIENE PELIGRO DE CAERSE?

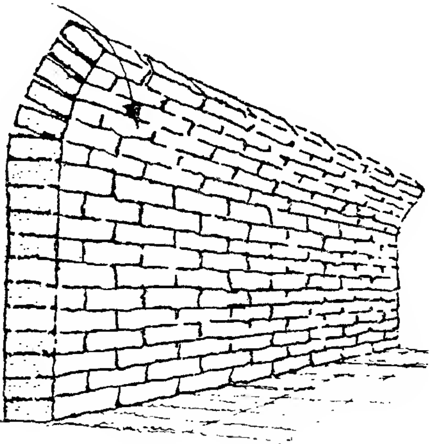
OBSERVA EL GRUESO DEL MURO(E) Y EL DESPLOME (D)



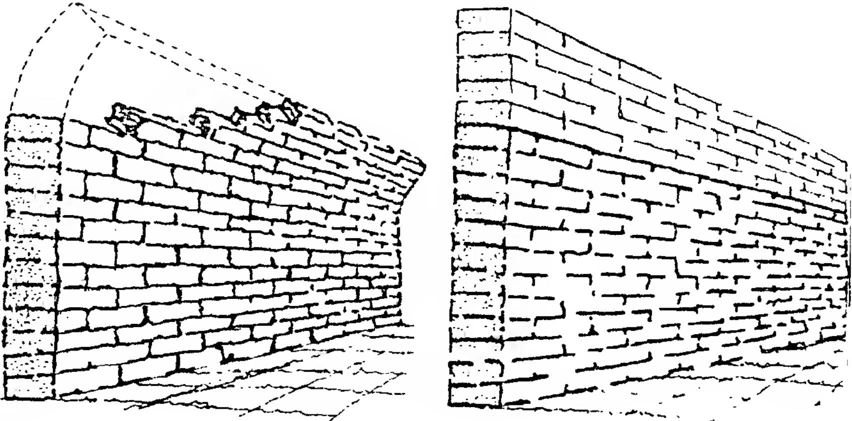
EL DESPLOME SE PUEDE CONOCER USANDO UNA PLOMADA Y MIDIENDO SU SEPARACION CON EL MURO.

GRUESO DEL MURO "E"	DESPLOME SIN PELIGRO	DESPLOME PELIGROSO
20 CMS.	MENOS DE 3.5 CMS.	MAS DE 3.5 CMS.
30	" " 5.5	" " 5.5
40	" " 7.5	" " 7.5
50	" " 9.0	" " 9.0
60	" " 11.0	" " 11.0

LOS MUROS NO PELIGROSOS PUEDEN CONSERVARSE.

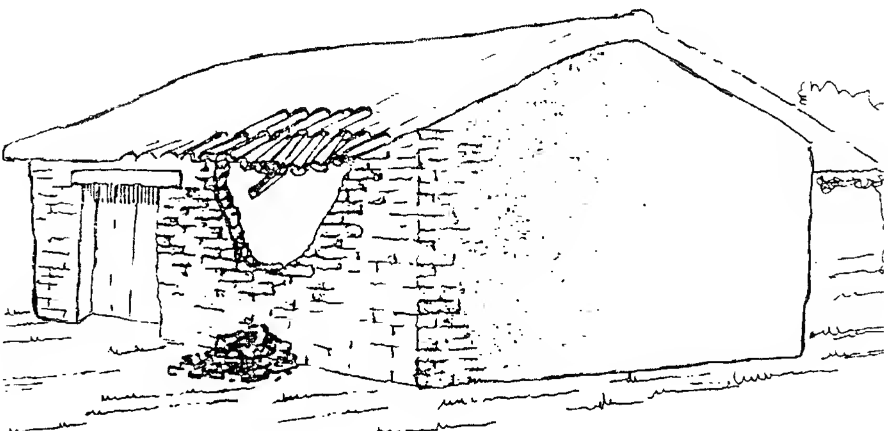


LOS MUROS CON DESPLOME PELIGROSO DEBEN TIRARSE Y CONSTRUIRSE DE NUEVO.

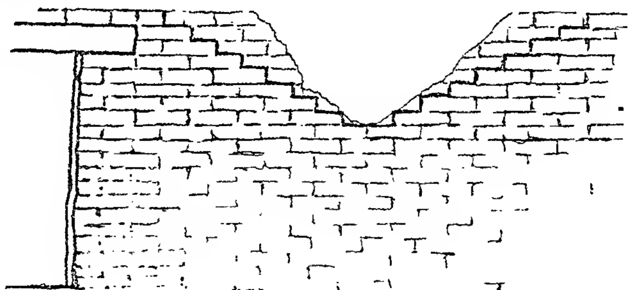


B2 REPARACIÓN DE MUROS

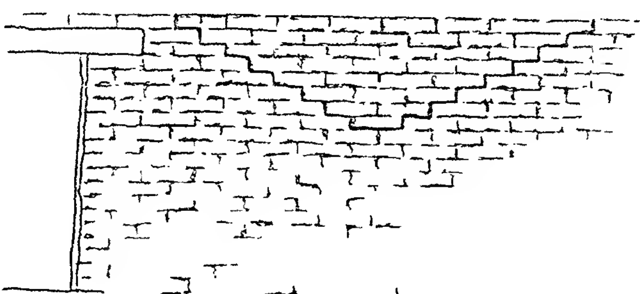
QUITA
LOS ADOBES
DAÑADOS QUE SIGUEN
EN EL MURO



DERRUMBADOS EN PARTE

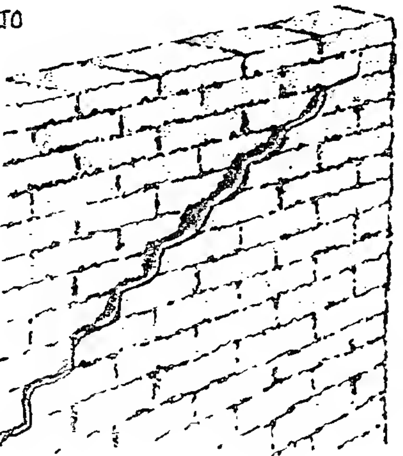


Y RECONSTRUYE
APROVECHANDO LOS ADOBES
DESPRENDIDOS NO DAÑADOS

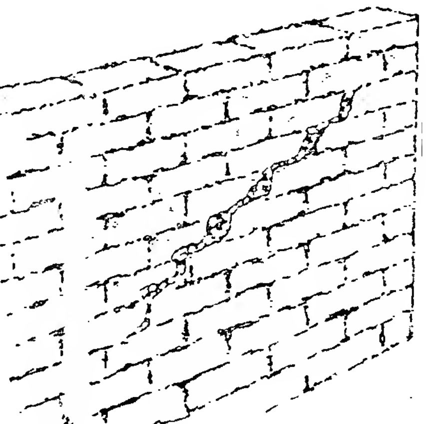


B6 REPARACION DE GRIETAS DIAGONALES

QUITA EL MATERIAL SUELTO QUE ESTE DENTRO DE LA GRIETA.



RELLENA CON BARRO, CAL Y RAJUELA APRETANDO EL RELLENO.

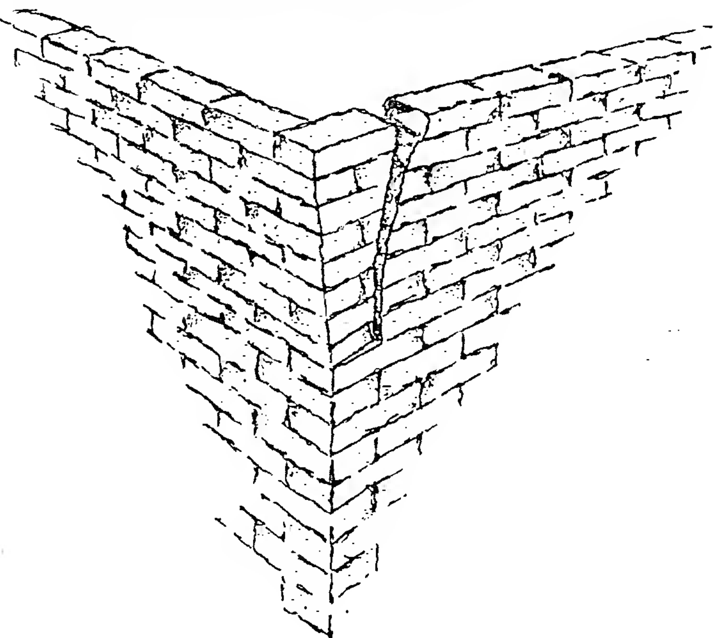


B4 REPARACION DE GRIETAS

1.- REVISA EL DESPLOME DE LOS MUROS.

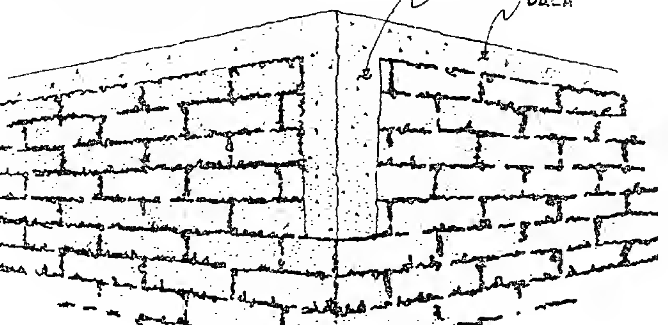
2.- SI EL DESPLOME NO ES PELIGROSO RETACA LA GRIETA CON BARRO, CAL Y RAJUELA.

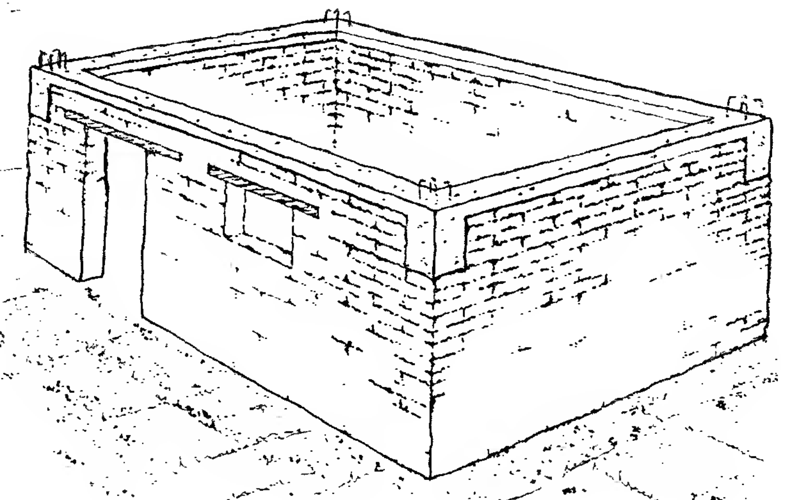
3.- SI EL DESPLOME ES PELIGROSO, RECONSTRUYE EL MURO CUATRAPEANDO LOS ADOBES NUEVOS.

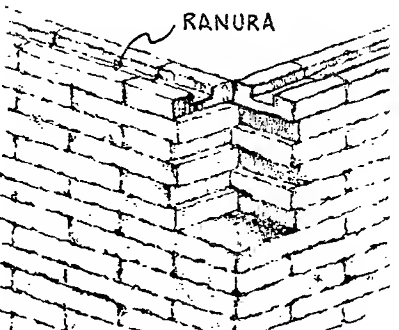


CONSTRUYE UN DENTELLON DE 50 CMS EN LA PARTE DE ARRIBA DE ACUERDO A LAS INDICACIONES DE LA PAGINA 52.

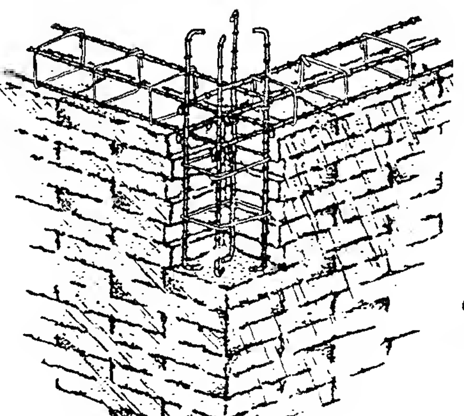
CONSTRUYE UNA DALA DE CONCRETO EN EL REMATE DE ARRIBA DE LOS MUROS.





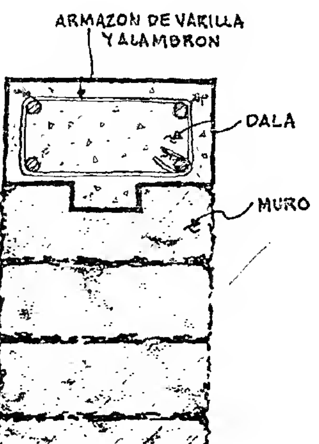


HAZ UNA RANURA DE 3CMS. DE ALTO POR 10 CMS. DE ANCHO, A TODA LA PARTE DE ARRIBA DE LOS MUROS.

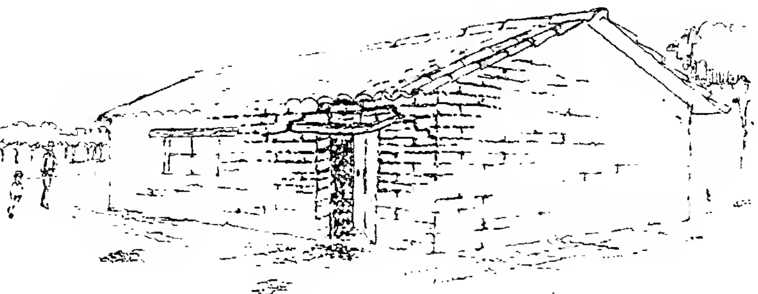


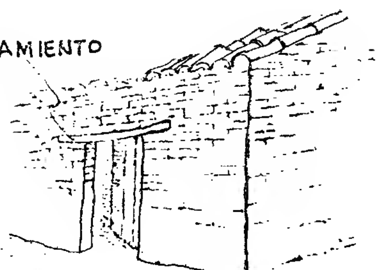
VACIA EL CONCRETO EN EL MOLDE, TENIENDO CUIDADO QUE LAS VARILLAS QUEDEN SEPARADAS DE LA MADERA Y EL ADOBE POR 2 CMS. DE CADA LADO.

CORTE DE LA DALA Y MURO



B·7 REPARACION DE GRIETAS SOBRE PUERTAS Y VENTANAS





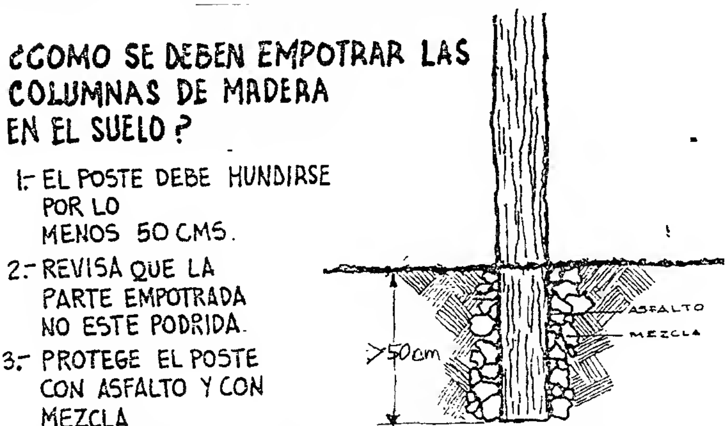
1. QUITA LAS PIEZAS SUELTAS.
2. COLOCA CERRAMIENTOS SI NO EXISTEN, O REFUERZA LOS QUE HAY
3. CAMBIA LOS CERRAMIENTOS SI SON VIEJOS O ESTAN APOLILLADOS.
4. CAMBIA EL ADOBE SUELTO O DAÑADO POR NUEVO. CONVIENE QUE LOS CERRAMIENTOS SEAN GRANDES Y QUE SE EMPOTREN 50 CMS. EN AMBOS LADOS.



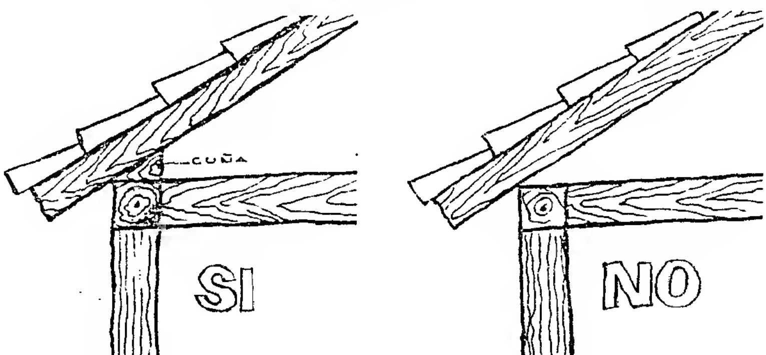
A·3·5 PILASTRAS O COLUMNAS

¿COMO SE DEBEN EMPOTRAR LAS COLUMNAS DE MADERA EN EL SUELO?

1. EL POSTE DEBE HUNDIRSE POR LO MENOS 50 CMS.
2. REVISA QUE LA PARTE EMPOTRADA NO ESTE PODRIDA.
3. PROTEGE EL POSTE CON ASFALTO Y CON MEZCLA.

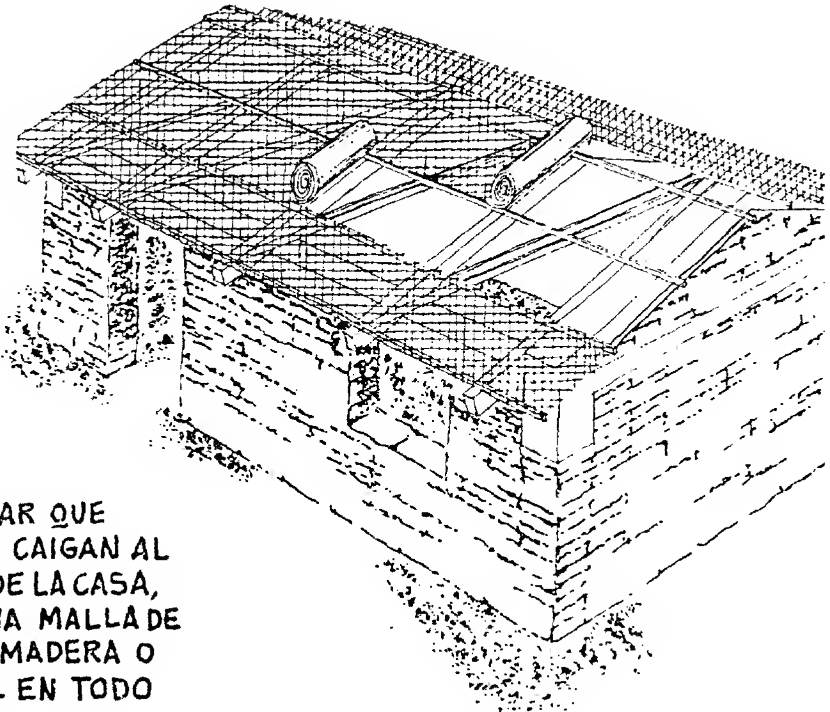


¿COMO DEBEN CONECTARSE CON EL TECHO?



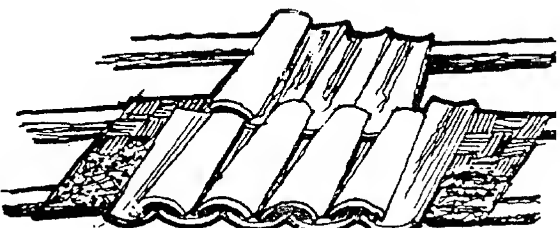
APOYO SEGURO TIENE CUÑA CLAVADA

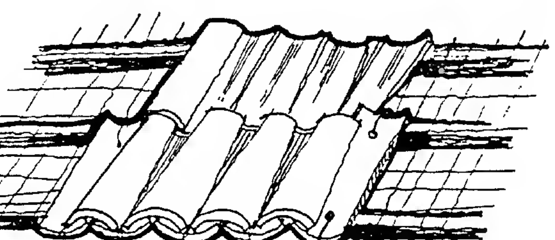
APOYO INSEGURO NO TIENE CUÑA Y SE DESLIZA



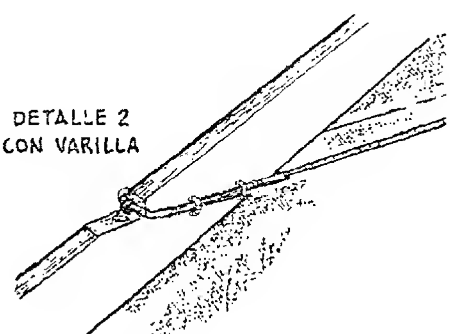
COLOCA LA TEJA SUJETANDOLA DE LA ORILLA,CON ALAMBRE A LA FAJILLA O TIRA DE MADERA.TAMBIEN LA PUEDES PEGAR CON MEZCLA SOBRE PETATE CLAVADO.

PARA EVITAR QUE LAS TEJAS CAIGAN AL INTERIOR DE LA CASA, COLOCA UNA MALLA DE ALAMBRE.MADERA O TEJAMANIL EN TODO EL TECHO.









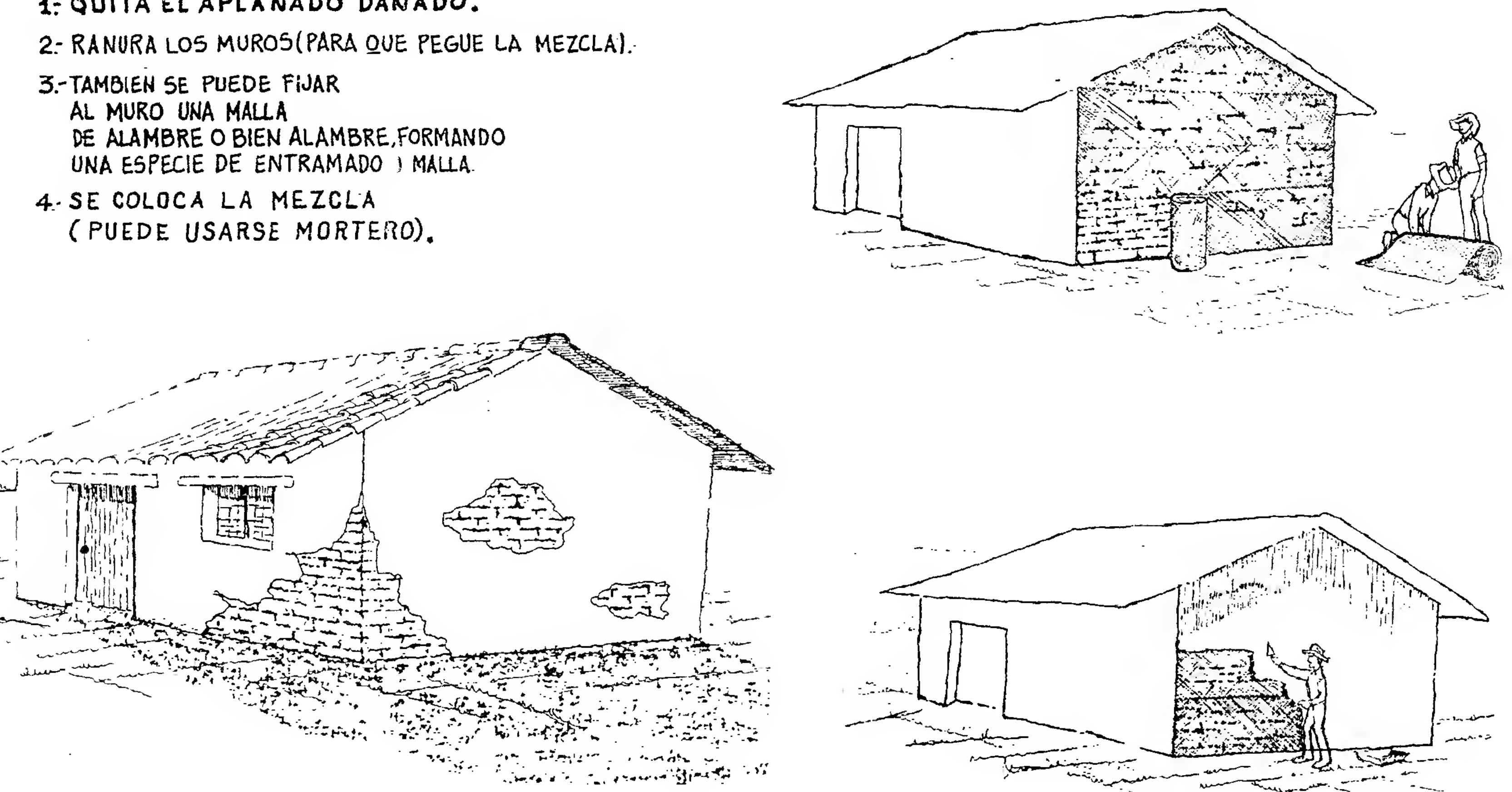
B.11 REPARACION DE APLANADOS EN MUROS

1.- QUITA EL APLANADO DAÑADO.

2.- RANURA LOS MUROS (PARA QUE PEGUE LA MEZCLA).

3.- TAMBIEN SE PUEDE FIJAR AL MURO UNA MALLA DE ALAMBRE O BIEN ALAMBRE, FORMANDO UNA ESPECIE DE ENTRAMADO Ó MALLA.

4.- SE COLOCA LA MEZCLA (PUEDE USARSE MORTERO).



REFERENCIAS

Alarcón P., Alcocer S.M. (1999), "Ensayes experimentales sobre rehabilitación de estructuras de adobe", Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 17 a 20 de Noviembre, Morelia, Mich., Vol. I, pp. 209-217.

Alcocer S.M., Aguilar G., Flores L., Bitrán D., Durán R., López-Bátiz O., Pacheco M.A., Reyes C., Uribe, C.M., Mendoza M.J. (1999), "El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999", CENAPRED, Informe IEG/02/99, julio, 185 pp.

Barrios G., Álvarez L. Rosi D. (1986), "Comportamiento de los suelos para la confección de adobes", Revista Informes de la Construcción, Instituto Eduardo Torroja, Vol. 37, No. 377, Madrid, España, pp. 43-49.

Bazán E., Padilla M., Meli R. (1978), "Seguridad de casas de adobe ante sismos. Estudios analíticos"; Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, 63 pp.

Departamento del Distrito Federal (DDF, 1995), "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería", Gaceta Oficial del Departamento del D.F., 27 de febrero, 16 pp.

Fundación ICA (1988), "Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985", Fundación ICA y Editorial Limusa, México, 133 pp.

Fundación ICA (1999), "Edificaciones de mampostería para vivienda", México, 316 pp.

Gutiérrez C.A. (1999), "Mapa de intensidades sísmicas del evento del 15 de junio de 1999", Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 17 a 20 de Noviembre, Morelia, Mich., Vol. II, pp. 744-753.

Hernández-B. O. y Meli R. (1977), "Diseño y construcción de estructuras de mampostería. Normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Con comentarios y ejemplos", No. 403, Serie ordinaria (azul), julio, 98 pp.

Hernández O., Meli R., Padilla M. (1979), "Refuerzo de vivienda rural en zonas sísmicas"; informe interno Instituto de Ingeniería, UNAM, agosto, 45 pp.

Hernández O., Giménez L. (1993), "Reflexiones sobre la mampostería en México, su pasado, presente y futuro", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8 a 11 de Octubre, Pto. Vallarta, Jal., pp. 795-802.

Hernández H.D. (1991) "Materiales y procedimientos de construcción para viviendas de bajo costo en El Salvador", Memoria del Simposium Internacional de Seguridad Sísmica en la Vivienda Económica", JICA–CENAPRED, 25 a 28 de febrero, pp. 212–237.

Juárez H., Guerrero J.J., Gama A., Whitney R.A., Vera R., Hurtado F. (1996), "El sismo del 9 de octubre de 1995, en Manzanillo, Colima", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, 16 a 19 de Noviembre, Mérida, Yuc., Vol. I, pp. 316-326.

Juárez H., Sordo E. (1997), "Descripción del comportamiento de estructuras durante sismos recientes", Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 19 a 22 de Noviembre, Veracruz, Ver., Vol. II, pp. 1341-1350.

Juárez H., Gómez A., Sordo E. (2000), "Recomendaciones para reducir la vulnerabilidad sísmica de estructuras de mampostería", Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, 1 a 4 de Noviembre, León Gto., artículo 86.

Masaki K., Abeki N., Seo K. (1996), "Daños causados por el sismo de Michoacán de mil novecientos 85", Reporte del Instituto de Arquitectos de Japón, JICA–CENAPRED, 366 pp.

McHenry P.G. (1996), "Adobe: cómo construir fácilmente", Editorial Trillas, primera edición, México, 229 pp.

Meli R. y Hernández-B. O. (1971), "Propiedades de piezas para mampostería producidas en el Distrito Federal", No. 297, , Serie ordinaria (azul), diciembre, 46 pp.

Meli R. y Hernández-B. O. (1975), "Efectos de hundimientos diferenciales en construcciones a base de muros de mampostería", No. 350, Serie ordinaria (azul), marzo, 125 pp.

Meli R. (1998), "Ingeniería estructural de los edificipos históricos", Fundación ICA, México, 220 pp.

Ojeda M. (1999), "Muros de tabique extruído ante cargas laterales: su comportamiento y aplicación práctica", Tesis profesional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, 153 pp.

Rodríguez M., Alarcón P., Machicao R. (1997), "Evaluación del comportamiento sísmico de estructuras a base de muros de mampostería durante el sismo de Caleta de Campos, del 11 de enero de 1997", Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 19 a 22 de Noviembre, Veracruz, Ver., Vol. II, pp. 1361-1370.

Salgado A., Domínguez L., Castrejón M., Arroyo M., Sánchez D., Fabián S., Daza A., Tumalán A., Jiménez M., Ibarias H., Álvares S. (1999), "Estudio estadístico de las propiedades sismoresistentes de la vivienda económica en el estado de Guerrero", Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 17 a 20 de Noviembre, Morelia, Mich., Vol. II, pp. 1002-1007.

Sánchez T. (2000), "Reglamentos de construcciones en la república mexicana", Memorias del VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica y II Reunión sobre la Enseñanza de la Ingeniería Sísmica en México, SMIS, 22 y 23 septiembre, Querétaro Qro.

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP, 1977), "Cartilla de reconstrucción para vivienda de adobe", 76 pp.

Secretaría de Gobernación (SG, 2000), "Métodos de refuerzo para la vivienda rural de autoconstrucción", Cartilla presentada en la Primera Jornada Nacional de Simulacros para la Prevención de Riesgo, 18 al 22 de septiembre, Acapulco Gro., 13 pp.

Sordo E., Gómez A., Juárez H., Gama A., Guinto E., Whitney R.A., Vera R., Mendoza E., Alonso G. (1996), "El sismo de Ometepec del 14 de septiembre de 1995", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, 16 a 19 de Noviembre, Mérida, Yuc., Vol. I, pp. 424-432.

Tena A. (compilador) (1997), “El macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995”, Univ. de Colima, Gobierno del Estado de Colima, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 343 pp.

Torres R.E. (1991) “Investigaciones de estructuras para viviendas de bajo costo y el rol del CISMID”, Memoria del Simposium Internacional de Seguridad Sísmica en la Vivienda Económica”, JICA–CENAPRED, 25 a 28 de febrero, pp. 424–445.